QD
461
.G73x

AUX
STOR
1

THE LIBRARY
BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY
PROVO, UTAH

DIE ATOMTHEORIE
IN IHRER NEUESTEN ENTWICKELUNG

21.—30. TAUSEND

QD
461
.G73x

DIE ATOMTHEORIE

IN IHRER NEUESTEN ENTWICKELUNG

SECHS VORTRÄGE
VON

DR. LEO GRAETZ
PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN

MIT 33 ABBILDUNGEN
DRITTE AUFLAGE

1921

J. ENGELHORNS NACHF. STUTTGART

Alle Rechte vorbehalten

Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft in Stuttgart

THE LIBRARY
BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY
PROVO, UTAH

VORWORT

Der Gegenstand dieser Vorträge, welche ich an verschiedenen Stellen, zum Teil während des Krieges im besetzten Gebiet, gehalten habe, hat, wie ich mich überzeugen konnte, ein allgemeines Interesse, nicht bloß bei Physikern und Chemikern, sondern bei den meisten naturwissenschaftlich gebildeten Personen gefunden. Es schien mir daher von Wert, diese Vorträge einem weiteren Kreis zugänglich zu machen, insbesondere da ich in denselben bestrebt war, den Weg ausführlich klarzulegen, auf dem die neuen umwälzenden Anschauungen über die Atome gewonnen wurden, und die Fortschritte zu erläutern, die durch sie in der Erklärung vieler Erscheinungen gewonnen wurden. Daß diese neuesten Vorstellungen noch nicht abgeschlossen sind, sondern noch mancherlei Schwierigkeiten und Dunkelheiten enthalten, die erst allmählich beseitigt werden müssen, beeinträchtigt ihren Wert nicht im mindesten und zeigt nur, daß die Wissenschaft hier in ganz unbekanntes, aber fruchtbares Neuland eingedrungen ist.

München, August 1918

Die dritte Auflage ist durch Aufnahme weiterer Resultate dieses neuesten Forschungsgebietes gegen die erste und zweite Auflage erweitert worden.

München, September 1920

GRAETZ

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

Erster Vortrag / Die Moleküle und Atome in der Chemie und der kinetischen Gastheorie .. .. 1—14

Die Atomtheorie in der Chemie und Physik * Atome und Moleküle * Ein- und mehratomige Moleküle der Elemente * Die Atomgewichte * Die Proutsche Hypothese * Das periodische System der Elemente * Die kinetische Gastheorie * Die wirkliche Größe und die wirkliche Masse der Moleküle und Atome * Die Loschmidtsche und die Avogadrosche Zahl * Theorie der Wirbelatome * Der Unteilbarkeit widersprechen die Spektra der Elemente.

Zweiter Vortrag / Die Atome und Ionen bei den elektrischen Vorgängen in Flüssigkeiten und Gasen * Die Atome der Elektrizität .. .. 15—31

Die Ionen in der Elektrolyse * Das Faradaysche Gesetz * Die atomistische Struktur der Elektrizität * Die Elektronen * Elementarladung * Gasentladungen * Kathodenstrahlen * Die freien negativen Elektronen * Scheinbare Masse * Größe und Masse der negativen Elektronen * Die Kanalstrahlen * Die positive Elektrizität * Neutrale und elektrisch geladene Atome und Moleküle * Kanalstrahlenanalyse.

Dritter Vortrag / Der Zerfall der Atome bei den radioaktiven Stoffen * Die Kerntheorie der Atome .. .. 32—47

Das Uran, Radium, Thorium und Aktinium als radioaktive Substanzen * Die α-β-γ-Strahlen * Die α-Teilchen sind doppelt positiv geladene Heliumionen * Emanation * Atomzerfall * Die Heliumionen sind Bestandteile der Atome der radioaktiven Stoffe * Wilsonsche Photographien der α-Strahlen * Zerstreuung der α-Teilchen * Rutherfordsche Atomtheorie * Die positive Ladung des Kerns ist gleich der Ordnungszahl des Atoms * Die Masse ist scheinbar * Größe des Kerns * Isotope Elemente.

Vierter Vortrag / Die Spektra der Röntgenstrahlen und die Kerntheorie der Atome 48—63

Beugungserscheinungen als Beweis für die Wellennatur des Lichts * Die Beugung der Röntgenstrahlen durch Kristalle * Die Braggsche Auffassung der Beugungsbilder * Röntgenspektra * Die K-, L- und M-Linien * Das Moseleysche Gesetz der Hochfrequenzspektra * Reihenfolge der Elemente und Lücken im periodischen System.

Seite

Fünfter Vortrag / Die Linienspektra und das Bohrsche Atommodell .. .. .. 64—81

Die Erzeugung und das Aussehen der Linienspektra * Analogie mit Schallschwingungen nicht vorhanden * Das Balmersche Gesetz * Die Balmersche Serie im Wasserstoff * Die ultraroten Wasserstofflinien * Die Rydbergsche Zahl * Serienlinien * Die Bohrsche Atomkonstruktion * Energiequantum und Wirkungsquantum * Die Radien der Kreise und die Geschwindigkeit der Elektronen * Die Ablösungsarbeit * Das Bohrsche Atom gibt für den Wasserstoff genau die Balmerschen Serienlinien und die Rydbergsche Konstante * Das Heliumatom * Die Ionisierungsspannung * Die komplizierteren Atome * Die Hochfrequenzspektra und das Moseleysche Gesetz * Die Leistungen und die Schwierigkeiten des Bohrschen Atommodells.

Sechster Vortrag / Weitere Untersuchungen über den Bau der Kerne, Atome, Ionen und Moleküle * Die Zerlegung des Stickstoffkernes .. .. 82—93

Atomchemie und Kernphysik * Die Wasserstoffkerne * Die Zerlegung des Stickstoffs * Anhaltspunkte zur Untersuchung des Baues der Atome und Ionen * Die vier ersten Elemente, Wasserstoff, Helium, Lithium, Beryllium * Versuche über die Anordnung der Ringe bei den Elementen höherer Ordnungszahl * Die Bildung der Moleküle durch gemeinsame Ringe * Das Wasserstoffmolekül * Ein Heliummolekül kann sich nicht bilden * Es kann auch keine Verbindung des Wasserstoffs und Heliums unter gewöhnlichen Umständen eintreten * Rückblick und Ausblick.

ERSTER VORTRAG

DIE MOLEKÜLE UND ATOME IN DER CHEMIE UND DER KINETISCHEN GASTHEORIE

*Die Atomtheorie in der Chemie und Physik * Atome und Moleküle * Ein- und mehratomige Moleküle der Elemente * Die Atomgewichte * Die Proutsche Hypothese * Das periodische System der Elemente * Die kinetische Gastheorie * Die wirkliche Größe und die wirkliche Masse der Moleküle und Atome * Die Loschmidtsche und die Avogadrosche Zahl * Theorie der Wirbelatome * Der Unteilbarkeit widersprechen die Spektra der Elemente*

SCHON hervorragende Köpfe des Altertums haben erkannt, daß es ein Irrtum ist, wenn wir annehmen, wie es der Schein verlangt, daß ein Stück Eisen, ein Stück Glas den Raum, den es einnimmt, vollständig und ohne Lücken erfülle. Die Tatsache, daß alle Körper bei tieferer Temperatur sich zusammenziehen, also einen kleineren Raum ausfüllen, ebenso wie die Tatsache, daß sie durch einen Druck auf ein kleineres Volumen zusammengepreßt werden können, beweisen schon, daß sie vorher den Raum nicht voll erfüllt haben können. Allerdings müssen die Lücken, die in den scheinbar stetigen Körpern existieren, sehr klein sein. Denn selbst bei der schärfsten mikroskopischen Vergrößerung, die wir heute anwenden können, kann man von ihnen nichts erkennen. Die Körper müssen danach aus außerordentlich kleinen, mikroskopisch nicht erkennbaren *Bausteinen* zusammengesetzt sein, die aber nicht lückenlos aneinander gereiht sind, sondern zwischen denen Abstände vorhanden sind die sich z. B. durch Temperaturänderungen oder durch Druck vergrößern oder verkleinern lassen.

Diese allgemeine Überlegung wird nun bekanntlich in der umfassendsten Weise bestätigt und präzisiert durch die gesamten Tatsachen der chemischen Forschung. Die überaus große Anzahl von chemischen Verbindungen welche die Natur direkt darbietet, oder welche in der Retorte des Chemikers erzeugt werden, zeigen immer bestimmte einfache Gewichtsverhältnisse der in ihnen enthaltenen Stoffe. Die einfache und durchaus genügende Erklärung dieser Tatsache, welche die Grundlage der ganzen Chemie geworden ist, ist die, daß jeder einfache, *elementare* chemische Stoff aus kleinsten Teilchen, den *Atomen* besteht, von denen jedes eine bestimmte Masse besitzt, so zwar, daß sämtliche Atome eines und desselben Stoffes gleichartig sind und dieselbe Masse besitzen, daß aber die Atome verschiedener Stoffe sich zunächst durch ihre Masse und dann auch durch ihre Eigenschaften voneinander unterscheiden. Da es ungefähr 90 verschiedene chemische Elemente gibt, so gibt es auch 90 verschiedene Atome. Aus der Zusammensetzung solcher verschiedener Atome bilden sich die kleinsten Bausteine aller chemischen Verbindungen, die *Moleküle* derselben. Die wirkliche Masse irgend eines der 90 Atome in Gramm anzugeben sind wir zwar heute imstande und wir werden diese Zahlen auch später anführen. Unter dem *Atomgewicht* versteht man aber nicht die wirkliche Masse eines Atoms in Grammen, sondern das Verhältnis der Masse dieses Atoms zu der Masse eines Atoms des leichtesten Stoffes, des Wasserstoffs. Die Atomgewichte sind also relative Zahlen, ohne Benennung. Ihre Bestimmung geschieht meistens auf chemischem Wege, und zwar mittels der Wage.

Die chemischen Zeichen für die einzelnen Elemente, H für Wasserstoff, He für Helium, O für Sauerstoff, N für Stickstoff, Li für Lithium usw. bedeuten nicht

bloß den Namen derselben, sondern zugleich ihr Atomgewicht. So bedeutet N den Namen für Stickstoff und zugleich die Zahl 14 als Atomgewicht desselben. Unter einem *Grammatom* einer Substanz versteht man so viel Gramm der Substanz, als das Atomgewicht angibt. Ein Grammatom Stickstoff ist also 14 g Stickstoff.

Die nicht elementaren, also alle zusammengesetzten Körper entstehen, wie gesagt, dadurch, daß ein oder mehrere Atome verschiedener Elemente in einen engen Zusammenhang treten und eine kleine Menge der Substanz bilden, die man ein *Molekül* nennt. Die Moleküle sind die Bausteine für die zusammengesetzten Körper. Die Moleküle können durch chemische Einwirkungen in ihre Atome zerlegt werden. Das *Molekulargewicht* ist stets gleich der Summe der Atomgewichte aller in einem Molekül enthaltenen Atome.

Danach scheint ein Unterschied zwischen den elementaren und den zusammengesetzten Stoffen, z. B. zwischen Chlor, das ein Element, und Chlorwasserstoff, das ein zusammengesetzter Stoff ist, darin zu bestehen, daß bei den ersteren die Atome selbst die Bausteine sind, bei den letzteren aber die Moleküle. Indes kann man beweisen, daß auch bei den meisten Elementen es nicht die einzelnen Atome sind, welche die getrennten Bausteine der Körper bilden, sondern daß auch bei ihnen zwei (oder auch mehr) Atome in einen engeren Zusammenhang treten, also ebenfalls ein *Molekül* bilden, das hierbei aber nicht aus Atomen verschiedener Art, sondern aus gleichen Atomen zusammengesetzt ist. Diese Behauptung ergibt sich, wenigstens für den gasförmigen Zustand der Stoffe, aus dem *Avogadroschen Prinzip*, welches einen nicht streng direkt beweisbaren, aber in seinen Folgerungen stets bestätigten Satz darstellt. Da nämlich alle Gase und Dämpfe, sowohl gasförmige Elemente wie Wasserstoff, Chlor, Schwefeldampf usw., wie auch gasförmige zusammengesetzte Stoffe, wie Chlorwasserstoff, Äthan, Kohlensäure, möge ihr Molekül noch so kompliziert zusammengesetzt sein, genau dieselben Gesetze befolgen, genau dieselbe Abhängigkeit ihres Volumens vom Druck und von der Temperatur zeigen, so müssen sie trotz der Verschiedenheit ihrer Atomgewichte bzw. Molekulargewichte etwas gemeinsam haben, und dieses Gemeinsame erkannte *Avogadro* darin, daß er den Satz aufstellte: *Alle gasförmigen Körper enthalten in demselben Volumen bei gleicher Temperatur und gleichem Druck die gleiche Anzahl von Molekülen.* Nun entstehen aus einem Liter Wasserstoff und einem Liter Chlorgas erfahrungsgemäß 2 Liter Chlorwasserstoffgas, von denen jedes Molekül je 1 Atom Wasserstoff und 1 Atom Chlor enthält. Wenn aber die Moleküle des einen Liters Wasserstoff und des einen Liters Chlor bloß je 1 Atom enthielten, so wäre bloß die Möglichkeit zur Bildung von einem Liter Chlorwasserstoff gegeben. Daraus folgt also, daß ein Molekül Wasserstoff aus 2 Atomen Wasserstoff und ebenso ein Molekül Chlor aus 2 Atomen Chlor bestehen muß. *Die zwei an sich gleichartigen Wasserstoffatome müssen also in einen engeren Zusammenhang getreten sein, um ein Molekül zu bilden, ebenso die zwei an sich gleichartigen Chloratome.* Warum und wodurch das geschieht, ist aber zunächst eine offene Frage.

Von den meisten elementaren Stoffen hat man beweisen können, daß ihre Moleküle nicht aus einem, sondern aus 2 Atomen bestehen. Nur von dem *Quecksilberdampf* war aus chemischen Gründen lange vermutet worden, daß

sein Molekül bloß 1 Atom Quecksilber enthält, daß es also ein *einatomiges* Molekül ist. Die kinetische Theorie der Gase macht nun für ein einatomiges Gas eine bestimmte Vorhersage. Bei den Gasen muß man nämlich zwei verschiedene spezifische Wärmen unterscheiden, die spezifische Wärme bei konstantem Druck (c_p) und diejenige bei konstantem Volumen (c_v). Für ein einatomiges Gas zeigt nun die kinetische Gastheorie, daß die erstere $^5/_3$mal so groß sein muß wie die zweite, so daß also das Verhältnis der beiden spezifischen Wärmen $^5/_3$ sein muß. Diese Voraussage ist nun für den Quecksilberdampf durch die berühmte Messung des Verhältnisses der beiden spezifischen Wärmen von *Kundt* und *Warburg* glänzend bestätigt worden. Die Einatomigkeit des Quecksilberdampfes ist dadurch physikalisch bewiesen worden. Lange Zeit war Quecksilber der einzige bekannte Stoff, der ein bloß einatomiges Molekül enthielt. Aber als *Ramsay* die neuen Gase in der Atmosphäre entdeckte, die sogenannten *Edelgase*, das Argon, Neon, Krypton, Xenon und das Helium, erwies es sich, daß diese alle ebenfalls den Wert $^5/_3$ für das Verhältnis der spezifischen Wärmen ergaben, daß sie also auch einatomig sind, daß also bei ihnen eine engere Verbindung zweier Atome aus irgendwelchen Gründen nicht stattfindet, nicht möglich erscheint. Zugleich sind diese Elemente auch von solcher Art, daß sie sich auch nicht mit Atomen anderer Elemente verbinden, sie sind *inerte*, träge Elemente, ihre Atome verharren durchaus in vollkommener Einsamkeit.

Alle Körper, mit Ausnahme der einatomigen Gase, bauen sich also aus Molekülen auf. Die Moleküle aber sind aus Atomen zusammengesetzt. Die Atome der Elemente sind daher die letzten kleinsten Bausteine aller Moleküle und danach aller Körper. Da es, wie erwähnt, rund 90 verschiedene Elemente gibt, so gibt es danach rund 90 verschiedene Bausteine, aus denen alle materiellen Körper, wie verschieden sie auch in ihrem Aussehen und in ihren Eigenschaften sein mögen, zusammengesetzt sind.

Man hatte natürlich schon lange Zeit die Vermutung gehegt und die Frage aufgeworfen, ob nicht diese verschiedenen Atome nur Zusammensetzungen in verschiedenen Anordnungen eines einzigen, eines *Grundatomes* seien, und dieses konnte zunächst nur das leichteste, das Atom des Wasserstoffs, sein. Schon 1815 stellte *Prout* die Hypothese auf, daß alle Atome sich aus dem Wasserstoffatom ableiten. Dann aber müßten die Atomgewichte *ganze Vielfache* des Atomgewichts des Wasserstoffs sein, also da dieses 1 ist, *ganze Zahlen* sein. Um diese Frage zu entscheiden, mußten *sehr genaue* Bestimmungen des Atomgewichts gemacht werden. Wenn z. B. das Atomgewicht des Quecksilbers durch eine erste, schon ziemlich genaue Bestimmung sich zu 200 ergibt, so ist dieser Wert der *Prout*schen Hypothese günstig. Wenn aber eine genauere Messung den Wert 200,6 ergibt, so spricht dieser gegen die *Prout*sche Hypothese. In der Tat wird die Ganzzahligkeit nur von wenigen Atomgewichten genau erfüllt, aber bei sehr vielen beträgt die Abweichung von einer ganzen Zahl nur höchstens $\pm$ 0,1.

Bestimmt ist also die *Prout*sche Hypothese in dieser Einfachheit nicht richtig, immerhin beträgt bei 63 Elementen, bei denen das Atomgewicht genauer bestimmt ist, die Zahl der Fälle, in welchen die Atomgewichte um nicht mehr als 0,1 von einer ganzen Zahl nach oben oder unten abweichen,

27, während sie nach der bloßen Wahrscheinlichkeit nur 18—19 betragen sollte, so daß also irgend ein Korn Wahrheit sicher in der *Prout*schen Hypothese, wenigstens für eine ganze Anzahl von Atomen, steckt.

Anderseits aber wurde schon lange darauf aufmerksam gemacht, daß die Atome von Stoffen, die chemisch ähnliche Natur haben, eine Anzahl von annähernden Gesetzmäßigkeiten in ihren Atomgewichten zeigen, indem nämlich vielfach die aufeinander folgenden Stoffe angenähert konstante Differenzen ihres Atomgewichts aufweisen. Diese angenäherten Gesetzmäßigkeiten haben ihren allgemeinsten Ausdruck in dem *periodischen System der Elemente* gefunden, welches von *Mendelejeff* und von *Lothar Meyer* (1869) aufgestellt wurde und welches aussagt, daß die chemischen Eigenschaften der Atome periodische Funktionen ihrer Atomgewichte sind. Für eine ganze Anzahl von chemischen Elementen ergibt sich dieses Gesetz, wie die nebenstehende Tabelle beweist, zwanglos, da, wenn man die Elemente nach der Größe der Atomgewichte ordnet, das neunte Element wieder dieselben chemischen Eigenschaften besitzt wie das erste. Indes zeigt sich eine durchgängige Gesetzmäßigkeit auch hierbei nicht. Bei den Atomen bis zum Mangan (Atomgewicht 54,9) ist die Gesetzmäßigkeit glatt vorhanden. Dann aber kommen die drei Elemente der Eisengruppe, Eisen, Nickel, Kobalt, welche in diese Reihe durchaus nicht passen und welche sehr wenig verschiedene Atomgewichte besitzen. Dann passen die Elemente wieder einigermaßen, bis die Palladiumgruppe (Ruthenium, Rhodium, Palladium) eine neue Unstimmigkeit hervorbringt. Und dasselbe geschieht zum dritten Male durch die Platingruppe (Osmium, Iridium, Platin). Die Schwierigkeit wurde noch größer, seit eine sehr große Anzahl neuer Elemente in den seltenen Erden entdeckt wurde. Ferner aber zeigt es sich, daß die Elemente, welche zu einer Kolumne gehören, also chemisch einander ähnlich sein sollen, sich noch wieder in je zwei Gruppen teilen, die voneinander doch durch starke Unterschiede getrennt sind. Man muß deswegen in jeder Kolumne noch zwei Reihen als a und b unterscheiden. Infolgedessen ist es nicht ohne gewisse Willkür möglich, die Reihen für das periodische System aufzustellen, und in der Tat ist es namentlich bei den mittleren Elementen häufig fraglich, in welche Kolumnen sie eingeordnet werden sollen. Aber wir wissen heute genau, aus den später zu besprechenden Untersuchungen über die Röntgenspektren, erstens, welches die richtige Reihenfolge der Elemente ist — die nicht immer genau mit der Reihenfolge der Atomgewichte übereinstimmt — und zweitens, wo in dem System noch Lücken, noch unbekannte Elemente vorhanden sind. Man hat verschiedenfache Anordnungen für das periodische System aufgestellt. In der nebenstehenden Tabelle ist *eine* solche gegeben, welche die neuen seltenen Erden noch nicht umfaßt und in welcher vor den schon von Mendelejeff und Lothar Meyer aufgestellten Kolumnen I bis VII noch eine Kolumne 0 eingerichtet ist, die die erst später entdeckten Edelgase enthält, und ferner eine Kolumne VIII, in welche die oben erwähnten, nicht in die Reihen passenden Elemente eingereiht sind. Diese Anordnung ist nicht vollständig. Die Elemente der seltenen Erden fehlen in dieser Tabelle zum Teil. Sie gehören zwischen Cer und Tantal. Wasserstoff, der eine Stelle für sich einnimmt, ist nicht eingereiht. Im vierten Vortrag wird eine ausführlichere, vollständige Tabelle gegeben werden.

o	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
Helium He 4,0	Lithium Li 6,94		Beryllium Be 9,1		Bor B 11,0		Kohlenstoff C 12,0		Stickstoff N 14,0		Sauerstoff O 16,0		Fluor F 19,0		
Neon Ne20,2	Natrium Na 23,0		Magnesium Mg 24,3		Aluminium Al 27,1		Silicium Si 28,3		Phosphor P 31,0		Schwefel S 32,0		Chlor Cl 35,5		
Argon A 39,9	Kalium K 39,1		Calcium Ca 40,1		Scandium Sc 44,1		Titan Ti 48,1		Vanadin V 51,0		Chrom Cr 52,0		Mangan Mn 54,9		Eisen, Kobalt, Nickel Fe 55,8, Co 58,9, Ni 58,7
—		Kupfer Cu 63,5		Zink Zn 65,4		Gallium Ga 69.9		Germanium Ge 72,5		Arsen As 74,9		Selen Se 79,2		Brom Br 79,9	
Krypton Kr82,9	Rubidium Rb 85,4		Strontium Sr 87,6		Yttrium Y 88,7		Zirkon Zr 90,6		Niobium Nb 93,5		Molybdän Mo 96,0		—		Ruthenium, Rhodium, Ru 101,7, Rh 102,9, Palladium Pd 106,7
—		Silber Ag 107,9		Cadmium Cd 112,4		Indium In 114,8		Zinn Sn 118,7		Antimon Sb 120,2		Tellur Te 127,5		Jod J 126,9	
Xenon X130,2	Cäsium Cs 132,8		Barium Ba 137,3		Lanthan La 139,0		Cer Ce 140,3		—		—		—		
—	—		—		—		—		Tantal Ta 181,5		Wolfram Wo 184,0		—		Osmium, Iridium, Platin Os190,9, Ir193,1, Pt 195,2
—		Gold Au 197,2		Quecksilber Hg 200,6		Thallium Tl 204,0		Blei Pb 207,2		Wismut Bi 208,0		—		—	
—	—			Radium Ra 226,0	—			Thorium Th 232,1	—			Uran U 238,2	—		

Daß man die einzelnen Kolumnen noch in zwei Abteilungen a und b teilen muß, um die Ähnlichkeit hervortreten zu lassen, wobei die in a oder in b enthaltenen Elemente sehr ähnlich, die Elemente beider Reihen aber weniger ähnlich sind, erkennt man aus der Betrachtung der untereinanderstehenden Elemente. So sind in der Kolumne I Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium zusammengehörige Stoffe, auch Kupfer, Silber, Gold gehören zusammen, aber die ersteren und die letzteren haben keine direkte chemische Gleichartigkeit. Und Entsprechendes findet in den anderen Kolumnen statt.

Man kann mit Bestimmtheit sagen, daß das periodische System wohl eine Andeutung, eine erste Annäherung an den wahren Zusammenhang der verschiedenen Atome gibt, daß aber eine ganze Reihe von Fragen hierbei noch im Dunkeln bleibt.

Für eine genauere Vorstellung über die Atome ist es nun vor allen Dingen wichtig, über ihre *Größe* und *Masse*, wenn möglich, bestimmte Zahlen zu erhalten. Die Atomgewichte geben ja nur die relativen Massen der einzelnen Atome, bezogen auf die des Wasserstoffs. Eine Frage von besonders hohem Interesse ist aber die, wie groß ist die wirkliche Masse eines Atoms in Grammen und, wenn wir uns die Atome kugelförmig vorstellen, wie groß ist der Radius eines Atoms? Eine direkte Messung ist unmöglich. Denn die Atome sind so klein, daß unsere leistungsfähigsten Mikroskope niemals etwas von ihnen zeigen können, und ihre Masse ist so gering, daß unsere Wagen, selbst wenn sie millionenfach empfindlicher gemacht werden könnten, als sie es sind, doch niemals diese feststellen lassen könnten.

Aber es gibt indirekte Methoden, durch welche wir genaueren Aufschluß über diese Größenverhältnisse gewinnen können. Zunächst zwar geben uns diese Methoden nur Aufschluß über die *Moleküle*. Da wir ja aber wissen, daß die einzelnen Moleküle aus einer bekannten Zahl von Atomen zusammengesetzt sind, so erfahren wir daraus auch das Gewünschte über die Atome. Eine dieser indirekten Methoden beruht auf der *kinetischen Theorie der Gase*. Ein jeder Körper kann entweder in festem Zustand auftreten oder in flüssigem oder in gasförmigem. Man kann ohne weiteres sagen, daß die Moleküle der festen und flüssigen Körper viel dichter aneinander liegen müssen, daß sie den Raum viel enger erfüllen müssen als im gasförmigen Zustand. Denn die beobachtbare Dichtigkeit — das spezifische Gewicht — eines Körpers, d. h. das Verhältnis der Masse eines Körpers zu seinem Volumen, ist im festen und flüssigen Zustand viel größer als im gasförmigen. Da also die Moleküle im gasförmigen Zustand durchschnittlich verhältnismäßig große Abstände voneinander haben, so kann man weiter annehmen, und das tut die kinetische Gastheorie, daß die Kräfte, welche im allgemeinen zwischen den Molekülen vorhanden sind und die mit wachsender Entfernung der Moleküle an Größe abnehmen, daß diese Kräfte für die Substanzen im gasförmigen Zustand verschwindend klein sind.

Die Eigenschaften der Gase beruhen nun nach dieser Theorie darauf, daß die einzelnen Moleküle eines Gases nicht in Ruhe, sondern in lebhafter Bewegung sind. Da aber die Kräfte zwischen den Molekülen wegen des verhältnismäßig großen Abstandes verschwinden, also auf ein Molekül keine Kraft wirkt, so kann die Bewegung desselben nur eine geradlinige sein mit konstanter Geschwindigkeit. Jedes Molekül fliegt also in gerader Linie fort. Bei der großen

Zahl der Moleküle, die in jedem noch so kleinen Raum vorhanden sind, muß dann das Molekül bald an ein anderes anstoßen. Bei dieser Annäherung an ein zweites Molekül werden die Molekularkräfte in Wirksamkeit treten. Ihr Einfluß kann aber so aufgefaßt werden, daß ein Molekül, wenn es ein zweites trifft, an dieses anstößt und von diesem ganz ebenso zurückgeworfen wird, wie ein Billardball, der an einen anderen anstößt. Ebenso, wenn es an die Wand des Gefäßes anstößt. So müssen wir uns also ein Gas vorstellen als bestehend aus einer ungeheueren großen Zahl von Molekülen, welche fortwährend durcheinander fliegen, dabei immer wieder an andere Moleküle anstoßen und infolgedessen die Richtung und die Größe ihrer Geschwindigkeit ändern, jedoch so, daß zwischen zwei Stößen sich jedes Molekül geradlinig mit bestimmter Geschwindigkeit bewegt. Jedes einzelne Molekül beschreibt dabei also eine Zickzackbahn, die aus lauter geraden Stücken von größerer oder geringerer Länge besteht.

Durch diese Annahme lassen sich *alle* Eigenschaften der Gase erklären. Zunächst entsteht der Druck, den die Gase auf die Wände des Gefäßes ausüben, durch die Stöße der Moleküle auf die Wand. Je mehr Moleküle in einem Raum sind, je größer also die Dichtigkeit des Gases ist, desto größer ist auch der Druck. Da die Dichtigkeit einer bestimmten Masse eines Gases in einem Raume dem Volumen desselben umgekehrt proportional ist, so ist dies auch mit dem Druck der Fall. Die Geschwindigkeit jedes einzelnen Moleküls wechselt fortwährend und ebenso haben alle Moleküle, die in dem gleichen Moment in einem Raume, z. B. in 1 ccm enthalten sind, sehr verschiedene Geschwindigkeit. Der Mittelwert aus allen diesen gleichzeitigen Geschwindigkeiten aller Moleküle charakterisiert nun das Verhalten des Gases, und da die Stoßkräfte, also auch der Druck des Gases, außer von der Masse der Moleküle von dieser *mittleren Geschwindigkeit* abhängen, so kann man aus dem beobachteten Druck diese mittlere Geschwindigkeit berechnen. Diese ergab sich für die verschiedenen Gase natürlich verschieden, die leichteren Gase haben größere, die schwereren kleinere Geschwindigkeit. Die mittlere Geschwindigkeit ist aber unabhängig von dem Druck des Gases, dagegen wächst sie mit wachsender Temperatur, und zwar wie die Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur. (Die absolute Temperatur ist = 273° + der gewöhnlichen Celsiustemperatur. Ein Gas von 17° C hat die absolute Temperatur 290°.) Die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle ist sehr groß, sie beträgt mehrere hundert Meter pro Sekunde. Sie ist z. B. bei 0° C für Luft 447 m/sec., für Wasserstoff 1692 m/sec., für Kohlensäure 362 m/sec.

Trotz dieser großen Geschwindigkeit bleiben aber die Moleküle immer doch nahezu an derselben Stelle, weil sie eben sehr häufig an andere Moleküle anstoßen, zurückgeworfen werden, wieder anstoßen usw. Der Weg eines Moleküls zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stößen ist bald größer, bald kleiner, ebenso ist er für alle Moleküle gleichzeitig sehr verschieden. Aber auch hierbei kann man den Mittelwert aller dieser Wege bilden, man nennt ihn die *mittlere Weglänge*, und diese Größe ist maßgebend für eine Reihe weiterer Erscheinungen, die die Gase der Beobachtung bieten, nämlich für die Reibung der Gase und für die Wärmeleitung derselben. Die Wärmeleitung z. B., welche ja bewirkt, daß, wenn in zwei Partien eines Gases verschiedene Temperaturen herrschen, diese sich von selbst ausgleichen, ist nach der kinetischen Theorie

ohne weiteres erklärbar. Denn in der wärmeren Partie haben die Moleküle durchschnittlich eine größere Geschwindigkeit, also größere lebendige Kraft, größere Energie, als in der kälteren Partie. Durch die Grenzfläche zwischen beiden Teilen des Gases fliegen also fortwährend raschere Moleküle aus dem wärmeren Teil in den kälteren und langsamere aus dem kälteren Teil in den wärmeren. Daher nimmt der Energieinhalt, also auch die Temperatur des wärmeren Teiles ab, die des kälteren zu, bis beide Teile gleiche Temperatur besitzen. Diese Abnahme wird um so rascher vor sich gehen, je größer (abgesehen von der Geschwindigkeit) die mittlere Weglänge der Moleküle ist, je weiter also ein wärmeres Molekül in die kältere Partie eindringen kann. Daraus folgt umgekehrt, daß man aus der Beobachtung der Wärmeleitung (und ähnlich der Reibung) die mittlere Weglänge bestimmen kann. Es ergeben sich, wie zu erwarten war, sehr kleine Werte für dieselbe. Sie hängen von der Dichtigkeit, also vom Druck des Gases ab; je verdünnter das Gas ist, um so größer ist natürlich die mittlere Weglänge, weil eben im Durchschnitt die Moleküle da weiter auseinanderstehen. So ergab sich z. B. bei Atmosphärendruck die mittlere Weglänge für Luft $= 0{,}96 \cdot 10^{-5}$ cm, für Wasserstoff $= 1{,}78 \cdot 10^{-5}$ cm, für Sauerstoff $1{,}03 \cdot 10^{-5}$ cm, für Kohlensäure $0{,}63 \cdot 10^{-5}$ cm.

Diese beiden Größen, die mittlere Geschwindigkeit und die mittlere Weglänge, anzuführen war notwendig, um die Frage zu beantworten, welche zunächst das größte Interesse besitzt, nämlich die Frage, *wie groß ist denn eigentlich die Zahl der Moleküle in einem Kubikzentimeter eines Gases bei Atmosphärendruck*? Man nennt diese gesuchte Zahl die *Loschmidtsche Zahl*, weil *Loschmidt* zuerst einen Weg zu ihrer Bestimmung angegeben hat. Mit dieser Frage steht in engstem Zusammenhang die andere, uns besonders interessierende, *wie groß ist der Radius eines Moleküls, wenn wir uns dasselbe als kugelförmig vorstellen*? Kennt man nämlich diesen Radius, so kennt man auch das Volumen je eines Moleküls, und wenn man noch die *Loschmidt*sche Zahl kennt, so kennt man das gesamte Volumen, welches die in 1 ccm enthaltenen Moleküle wirklich einnahmen. Dieses Volumen aber wird angenähert dasjenige sein, welches diese Moleküle einnehmen, wenn das Gas durch Druck oder Abkühlung zu einer Flüssigkeit oder gar zu einem festen Körper geworden ist. Denn dabei kann man annehmen, daß die Moleküle möglichst eng gepackt aneinander liegen werden. (In Wirklichkeit wird die Flüssigkeit noch ein größeres Volumen haben, als dem Volumen der Summe der Moleküle entspricht.) Die Dichtigkeit einer Substanz im flüssigen oder festen Zustand ist aus diesem Grunde außerordentlich viel größer als im gasförmigen Zustand. Z. B. hat gasförmiger Sauerstoff bei Atmosphärendruck die Dichtigkeit 0,00143, während als die größte Dichtigkeit des flüssigen Sauerstoffs $= 1{,}249$ beobachtet wurde, also ist das Verhältnis des Volumens der dicht aneinander liegenden Moleküle zu dem Volumen derselben Moleküle im Gaszustand bei Atmosphärendruck für

Sauerstoff $\frac{0{,}00143}{1{,}249} = 0{,}0011$. Diese Zahl nennt man den *Kondensationskoeffizienten*. Bedenkt man nun, daß im eng zusammengepackten Zustand der Mittelpunkt eines Moleküls um den Radius verschoben werden müßte, bis er ein zweites Molekül trifft, während im Gaszustand der Mittelpunkt eines

Moleküls um die mittlere Weglänge verschoben werden muß, bis er ein anderes Molekül trifft, so erkennt man auch ohne genaue Rechnung, daß der Kondensationskoeffizient angenähert gleich dem Verhältnis des Radius eines Moleküls zu der mittleren Weglänge sein wird. Folglich kann man den Radius eines Moleküls aus der mittleren Weglänge und dem Kondensationskoeffizienten berechnen. So ergibt sich z. B. für Sauerstoff, für welchen der Kondensationskoeffizient = 0,0011 und die mittlere Weglänge = $1{,}03 \cdot 10^{-5}$ ist, der Radius des Moleküls nach dieser Betrachtungsweise angenähert = $0{,}0011 \cdot 1{,}03 \cdot 10^{-5} = 1{,}13 \cdot 10^{-8}$ cm.

Auf diese Weise hat man durch *genauere* Rechnung für die Radien der Moleküle einzelner Stoffe folgende Werte gefunden:

	Radius eines Moleküls
Wasserstoff	$1{,}00 \cdot 10^{-8}$ cm
Helium	0,85 . „ „
Stickstoff	1,35 . „ „
Sauerstoff	1,30 . „ „
Argon	1,35 . „ „
Chlor	2,00 . „ „
Quecksilber	1,40 . „ „
Äther	3,00 . „ „

Natürlich geben diese Zahlen nur angenäherte Werte; denn es ist z. B. nicht anzunehmen, daß ein so kompliziertes Molekül, wie das des Äthers, $C_4H_{10}O$, überhaupt kugelförmig sei. Nur für die einatomigen Moleküle (Helium, Argon, Quecksilber in unserer Tabelle) läßt sich vielleicht die Kugelform annehmen und für diese geben dann die erhaltenen Zahlen zugleich die *Radien der Atome*. Bei den zweiatomigen Molekülen, wie denen des Wasserstoffs, Sauerstoffs, Stickstoffs, Chlors, kann man nur sagen, daß deren Atome, wenn sie kugelförmig sind, kleinere Radien haben müssen als 1,0, 1,3, 1,35, $2{,}0 \cdot 10^{-8}$ cm.

Das Resultat dieser Betrachtungen der kinetischen Gastheorie gibt uns also einen Anhaltspunkt für die wirkliche Größe der Atome oder, genauer gesagt, für deren Größenordnung. *Man muß annehmen, daß der Radius eines (kugelförmig gedachten) Atoms von der Größenordnung* 10^{-8} cm *ist*. Die verschiedenen Atome haben Radien, deren Größe einige Male größer oder kleiner ist als 10^{-8} cm. Die Größe 10^{-8} ist der zehnmillionste Teil eines Millimeters.

Durch die Ermittlung der Größe der Moleküle ist es nun leicht, auch einen bestimmten Wert zu erhalten für die Zahl der Moleküle in einem Kubikzentimeter, also für die *Loschmidtsche Zahl*. Denn wenn man bedenkt, daß im Durchschnitt jedes Molekül um die mittlere Weglänge fortfliegt, bis es wieder ein Molekül trifft, so erkennt man, daß der zylindrische Raum, den ein Molekül bei diesem Flug durchstreicht, von solcher Größe ist, daß in ihm im Mittel nur ein Molekül vorhanden ist. So groß also das Verhältnis von 1 ccm zu diesem Raum ist, so groß ist auch die Zahl der Moleküle in 1 ccm, so groß ist also die *Loschmidt*sche Zahl.

Die Rechnung ergibt, daß in einem Kubikzentimeter Gas bei Atmosphärendruck

27,2 Trillionen

Moleküle enthalten sind. Eine Trillion ist 10^{18}. Diese *Loschmidt*sche Zahl hat denselben Wert für alle Gase, da ja nach dem *Avogadro*schen Prinzip alle Gase

im Kubikzentimeter bei gleichem Druck und gleicher Temperatur dieselbe Zahl von Molekülen enthalten.

Denkt man sich diese Moleküle in dem Kubikzentimeter gleichmäßig verteilt, so kommt auf jedes Molekül ein kleiner Würfel von dem Inhalt $\frac{1}{27{,}2 \cdot 10^{18}}$ ccm. Die Seitenlänge dieses Würfels ist daher rund $= \frac{1}{3 \cdot 10^{6}}$ ccm $= 3{,}3 \cdot 10^{-7}$ cm $= 3-4$ Milliontel Millimeter. Dies ist also die Größe des mittleren Abstandes je zweier Moleküle. Der Abstand zweier Moleküle ist also im Mittel etwa 30—40mal so groß wie der Radius eines Moleküls.

Aus der *Loschmidt*schen Zahl kann man noch eine weitere, wichtige Zahl berechnen, die man die *Avogadrosche Zahl* nennt. Nehmen wir nämlich je 1 ccm von verschiedenen Gasen, etwa Wasserstoff, Sauerstoff und Chlor, so sind die Massen dieser gleichen Volumina nicht gleich, sondern sie verhalten sich wie die Molekulargewichte, nämlich hier wie 2 : 32 : 71. Allgemein: die Volumina verschiedener Gase, deren Massen sich wie die Molekulargewichte verhalten, sind gleich. Daraus folgt, daß auch die Volumina, die *ein Grammolekül* eines jeden Gases (bei gleichem Druck und gleicher Temperatur) einnimmt, einander gleich sind und daher nach *Avogadro* auch die gleiche Anzahl von Molekülen enthalten. Diese Zahl, die Anzahl der Moleküle, welche in einem Grammmolekül eines jeden Gases (beim Druck von 1 Atmosphäre und bei 0^{0} C) enthalten ist, nennt man die *Avogadrosche Zahl.* Man kann sie leicht finden, wenn man berechnet, wieviel Kubikzentimeter ein Grammolekül Wasserstoff (2 Gramm Wasserstoff) einnimmt. Ein Gramm Luft nimmt im Normalzustand den Raum 773 ccm ein. Wasserstoff ist 14,475mal leichter als Luft, also nehmen 2 Gramm Wasserstoff (ein Grammolekül) den Raum $2 \times 14{,}475 \times 773 = 22378$ ccm ein. Mithin enthält ein Grammolekül Wasserstoff und ebenso ein Grammolekül jeder anderen Substanz im gasförmigen Normalzustand

$$27{,}2 \cdot 10^{18} \times 22378 = 60{,}9 \cdot 10^{22} \text{ Moleküle.}$$

Dies ist also die Avogadrosche Zahl.

Aus dieser kann man nun leicht die *wirkliche Masse* eines Wasserstoffmoleküls und ebenso die eines jeden anderen Moleküls berechnen. Denn da $60{,}9 \cdot 10^{22}$ Moleküle Wasserstoff zusammen die Masse 2 Gramm besitzen, so hat jedes Wasserstoffmolekül die Masse

$$\frac{2}{60{,}9 \cdot 10^{22}} = 3{,}28 \cdot 10^{-24} \text{ Gramm.}$$

10^{-24} Gramm ist 1 Gramm dividiert durch eine Quadrillion. Ein Molekül Sauerstoff hat natürlich eine 16mal, ein Molekül Chlor eine 35,5mal so große Masse. Ein Atom Wasserstoff hat danach die Hälfte der obigen Masse, also $1{,}64 \cdot 10^{-24}$ Gramm. Diese Zahl wird uns später zu einer weiteren Berechnung dienen.

Alle diese Zahlen für die Größe und Masse und Zahl der Moleküle und Atome sagen uns direkt nichts, was wir irgendwie uns vorstellen könnten. Das Verhältnis des Maßstabs, mit dem wir zu rechnen gewohnt sind, zu diesen so

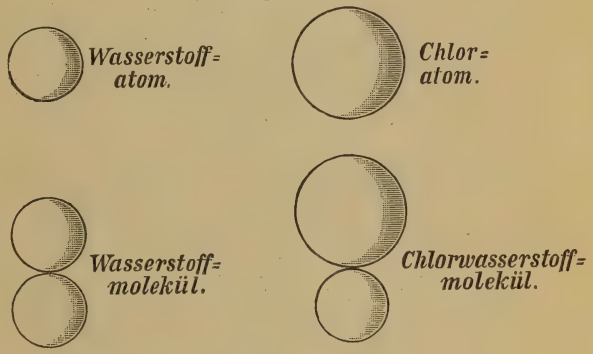
kleinen oder so großen Werten, ist ein zu verschiedenes. Bei Längen haben wir als Maßstab in unserer Gewohnheit 1 mm und wir können uns den zehnmillionsten Teil, den Radius eines Atoms, davon absolut nicht vorstellen. Wir können uns einen ungefähren Begriff davon machen, wenn wir unseren Maßstab (1 mm) 10millionenfach vergrößern, also auf 10 Kilometer bringen. Dann entspricht der Radius eines Atoms der Größe von 1 mm.

Noch schwieriger ist die Masse eines Atoms mit den uns gewohnten Massen zu vergleichen. Hier muß man schon die ganze Erde zu Hilfe nehmen. Die ganze Erdkugel hat eine Masse von etwa $2 \cdot 10^{24}$ Kilogramm. Die Masse eines Wasserstoffatoms verhält sich also zu der Masse eines Gramms, rund wie die Masse eines Kilogramms zu der Masse der ganzen Erdkugel.

Und von diesen Atomen, diesen winzigsten Stäubchen der Materie, zeigen die neuesten Forschungen, von denen wir in diesen Vorlesungen sprechen werden, daß sie selbst wieder ganze Welten sind, daß jedes von ihnen ein ganzes Sonnensystem darstellt.

Die einfachste Vorstellung, die man sich nach den bisher besprochenen Tatsachen von den Atomen machen kann, ist die einer sehr kleinen kugelförmigen oder anders gestalteten Masse aus dem betreffenden chemischen Stoffe. Ein Molekül würde einer Aneinanderlagerung zweier oder mehrerer Atome gleichen Stoffes oder verschiedener Stoffe entsprechen. In Fig. 1 ist nach dieser primitivsten Vorstellung in der oberen Reihe ein Wasserstoffatom und ein Chloratom dargestellt, während die untere Reihe die Darstellung eines Wasserstoffmoleküls und eines Chlorwasserstoffmoleküls gibt. Warum hierbei zwei Wasserstoffatome immer in eine engere Verbindung zu einem Wasserstoffmolekül zusammentreten, bleibt nach dieser Vorstellung durchaus unverständlich.

Fig. 1.



Die Atome der einzelnen Stoffe werden, wie schon ihr Name sagt (a-tomos, unteilbar), als absolut unveränderliche, unteilbare Körperchen angesehen. Dabei aber sind noch zwei verschiedene Möglichkeiten vorhanden. Die eine würde sagen, daß die Atome uns zwar als unteilbare Körper erscheinen, aber nur deswegen, weil wir noch nicht imstande sind, weil wir nicht oder noch nicht die Kraft besitzen, sie zu zerteilen. Ein Goldatom als solches wäre unteilbar. Da es aber einen Raum einnimmt, können wir es uns aus noch kleineren Teilen zusammengesetzt denken, nur wären diese Teile nicht mehr Gold, sondern etwas anderes, aus dem sich eben das Gold zusammensetzt. Diese Annahme würde also die Unteilbarkeit der Atome nur als etwas Vorläufiges, Relatives ansehen, und sie berührt sich offenbar mit der oben erwähnten *Prout*schen Hypothese,

daß die Atome selbst aus anderen Bestandteilen zusammengesetzt sind, nur brauchen diese Bestandteile nicht gerade das Wasserstoffatom zu sein. Diese Ansicht hat sich durch die Forschungen der letzten Jahrzehnte als berechtigt erwiesen.

Es sei aber trotzdem noch die andere Annahme erwähnt, welche aussagt, daß aus irgend einem Grunde die Atome *absolut unteilbare Größen* sind. Dann müßte also die Unteilbarkeit in ihrer Natur begründet sein, nicht bloß in der Mangelhaftigkeit unserer Hilfsmittel. Und offenbar ist die Frage, wie das möglich ist, auch dann berechtigt und von Interesse, wenn wir selbst die Atome in kleinere Körperchen, in *Uratome*, zerlegen könnten. Denn dann würde immer noch die Frage bestehen bleiben, warum sind diese Uratome wirklich unteilbar? Es handelt sich also um die Frage, wie könnte die Unteilbarkeit einer gewissen Menge Materie erklärt werden? Darauf gibt eine sehr geistreiche Theorie, die von dem englischen großen Physiker Lord *Kelvin* schon vor 50 Jahren aufgestellt wurde, die *Theorie der Wirbelatome*, eine befriedigende Antwort. Es war nämlich von *Helmholtz* bewiesen worden, daß in einer reibungslosen Flüssigkeit Wirbelringe existieren können. Das sind ringförmige Gebilde, bei denen die Flüssigkeitsteilchen in rotierender Bewegung um die Mittellinie des Ringes begriffen sind. Aus den allgemeinen Eigenschaften einer solchen Flüssigkeit folgt aber, daß solche Wirbel nicht durch die gewöhnlichen einfachen, sogenannten konservativen Kräfte in der Natur hervorgebracht werden können, noch auch durch dieselben zerstört werden können. Vielmehr müssen solche Wirbel, wenn sie überhaupt in einer Flüssigkeit vorhanden sind, in dieser von Uranfang an existiert haben, und sie können durch konservative Kräfte nicht auseinandergerissen und zerstört werden. Wenn man mit einem noch so scharfen Messer gegen einen solchen Wirbelring stößt und ihn zu zerschneiden sucht, so gelingt das nicht. Der Wirbelring ändert seine Form, er biegt sich um das schneidende Messer herum, aber die wirbelnden Teile lassen sich nicht trennen, die wirbelnde Menge Flüssigkeit bleibt immer in ungestörtem Zusammenhang. Angenähert lassen sich die Wirbelringe und ihre Eigenschaften erkennen an den Rauchringen, welche geschickte Raucher in die Luft blasen. Angenähert nur; denn die Luft ist keine reibungslose Flüssigkeit, wie sie bei den *Helmholtz*schen Aussagen vorausgesetzt wird. In der Tat sieht man diese Rauchringe auch, nachdem sie eine Zeit bestanden haben, sich auflösen. Das kommt aber nur daher, daß eben hier Reibungskräfte, nicht konservative Kräfte in der Flüssigkeit vorhanden sind. In einer reibungslosen Flüssigkeit dagegen bleiben die wirbelnden Teile dauernd zusammen, sie bilden immer einen geschlossenen Ring, wenn auch dessen Form sich ändert. Ein solcher Wirbelring ist also in Wirklichkeit etwas Unteilbares, ein a-tomos. *Kelvin* nimmt nun an, daß der Äther, den wir uns als überall vorhanden, alle Körper durchdringend, vorstellen müssen — da er der Träger der Lichtbewegung ist und das Licht alle Körper durchdringt —, daß der Äther die Eigenschaften einer reibungslosen Flüssigkeit besitzt. In ihm seien nun viele solche Wirbel von Anfang an enthalten. Diese Wirbel, die unzerstörbar sind, bilden die Atome der Körper, die Atome sind *Wirbelatome*. Da wir sie mit unseren Kräften nicht bilden können, so kann die Anzahl der in der Welt vorhandenen Atome nicht vergrößert werden. Sie kann aber auch nicht

verkleinert werden, da wir solche Wirbel nicht zerstören können. Kurz, diese Wirbel haben die wesentliche Eigenschaft der Atome, die Unzerstörbarkeit und Unteilbarkeit. Wenn nun auch, wie gesagt, die Unteilbarkeit der Atome heute nicht mehr als tatsächlich angenommen werden kann, so bleibt die *Kelvin*sche Theorie doch von großem philosophischem Wert, da ja dieselbe Frage über die Möglichkeit der Unteilbarkeit nur von den Atomen auf die Uratome zurückgeschoben wird. Man könnte diese Theorie heute, da wir als die Bestandteile der Atome die positiven und negativen Elektronen erkennen werden, passend als die Wirbeltheorie der Elektronen bezeichnen.

Der Annahme nämlich, daß die Atome einfache unteilbare Körperchen seien, hat sich schon lange eine Reihe von Schwierigkeiten entgegengestellt. In erster Linie kommen da optische Erscheinungen in Betracht. Bekanntlich zeigen alle leuchtenden Gase und Dämpfe, wenn man ihr Licht durch einen Spalt und ein Prisma oder ein Beugungsgitter gehen läßt, sehr charakteristische Erscheinungen. Während das Sonnenlicht oder das Licht einer weißglühenden Bogenlampe, in dieser Weise untersucht, ein vollständiges *Spektrum* gibt, ein Farbenband, das sich von Rot bis zu Violett hinzieht und in sich alle Übergänge von Rot durch Orange, Gelb, Grün, Hellblau, Dunkelblau bis Violett zeigt, ist das bei den farbigen Gasen und Flammen anders. Bringt man ein Natriumsalz, etwa Kochsalz oder Glaubersalz, in die Flamme eines Bunsenbrenners, so wird diese Flamme schön gelb gefärbt, und wenn man dieses Licht durch einen Spalt und ein Prisma gehen läßt, so erhält man statt eines Spektrums nur eine scharfe gelbe Linie, die man bekanntlich als D-Linie bezeichnet, und die bei genügender Dispersion durch das Prisma sich als eine Doppellinie D_1 und D_2 zu erkennen gibt.

Da alle Natriumsalze dieselbe Linie zeigen, Chlornatrium, Natriumsulfat, Natriumnitrat usw., so rührt diese Linie nur von dem *Atom* des Natriums her. Ebenso zeigt eine durch Lithium rot gefärbte Flamme zwei Linien im Spektrum, eine rote und eine orangefarbene. Eine Kaliumflamme zeigt eine rote und eine violette, eine Cäsiumflamme eine Linie in Rot, eine in Orange, eine grüne und zwei blaue Linien. Da das Licht aus Schwingungen besteht und einer jeden Farbe eine bestimmte Schwingungszahl entspricht, so folgt daraus, daß ein Atom eines Körpers unter Umständen Schwingungen von verschiedener Schwingungszahl ausführen kann. Auch die einfachen Gase kann man, wenn sie in verdünntem Zustande sind, durch Hindurchsenden eines elektrischen Stromes zum Leuchten bringen, wie das in den *Geißler*schen Spektralröhren geschieht. Da zeigen sich z. B. beim Wasserstoff zunächst 4 Linien, eine rote, eine grüne, eine blaue und eine violette. Beim Helium sind sogar 7 Linien zu sehen und das Argon, Krypton, Xenon geben sehr linienreiche Spektren. In dem Spektrum des Eisendampfs hat man über 2000 Linien gefunden. Diese optischen Schwingungen, soweit sie bisher überhaupt unter Regeln gebracht werden konnten, befolgen ganz andersartige Gesetzmäßigkeiten als die Schwingungen ausgedehnter Körper. Daraus folgt aber, daß innerhalb der Atome Schwingungen, periodische Bewegungen, sehr verschiedener Art vor sich gehen müssen, welche eben die Ursache dieser Lichtaussendung sind. Und daher ist schon aus dem Linienreichtum der Spektra der Elemente der Schluß zu ziehen, daß die Atome nicht einfache Körper sein

können, sondern irgendwelche Teile enthalten müssen, daß sie also nicht wirkliche „Atome“ sein können. Schon aus diesen altbekannten Erfahrungen erkennt man also, daß in den Atomen, bei denen die Physik und Chemie sich lange als den letzten Bausteinen der Materie beruhigt hatte, noch große Probleme liegen, daß es sich eben gerade darum handelt, die Konstitution dieser scheinbar einheitlichen Körper aufzuklären.

ZWEITER VORTRAG

DIE ATOME UND IONEN BEI DEN ELEKTRISCHEN VORGÄNGEN IN FLÜSSIGKEITEN UND GASEN / DIE ATOME DER ELEKTRIZITÄT

*Die Ionen in der Elektrolyse * Das Faradaysche Gesetz * Die atomistische Struktur der Elektrizität * Die Elektronen * Elementarladung * Gasentladungen * Kathodenstrahlen * Die freien negativen Elektronen * Scheinbare Masse * Größe und Masse der negativen Elektronen * Die Kanalstrahlen * Die positive Elektrizität * Neutrale und elektrisch geladene Atome und Moleküle * Kanalstrahlenanalyse*

DIE Fortschritte in der Erkenntnis des Wesens der Atome gingen von der Elektrizitätslehre aus. Als sich um die Mitte des vorigen Jahrhunderts die neuen Erfahrungen im Gebiet der Elektrizität immer mehr häuften, als die Wärmewirkungen, die elektrolytischen Wirkungen, die magnetischen und elektrodynamischen Wirkungen der elektrischen Ströme erforscht wurden und namentlich als durch *Faraday* die Induktionswirkungen und durch *Hertz* die wellenförmige Ausbreitung derselben, die elektrischen Wellen, erkannt wurden, da wurde es immer schwieriger, sich ein widerspruchsloses Bild von dem Wesen der Elektrizität zu machen. Die Verschiedenheit der Wirkungen war so bedeutend, daß es fast unmöglich erschien, dieselben unter einen Hut zu bringen. Eine Reihe von Wirkungen der Elektrizität war durchaus von der Art, als ob die Elektrizität ein Stoff wäre, andere aber schienen zu der Annahme zu zwingen, daß die Elektrizität auf irgend einer Bewegung des Äthers beruhe. In der Tat haben die Ansichten der Physiker darüber vielfach gewechselt, und als *Hertz* seine prachtvollen Entdeckungen über elektrische Wellen und Strahlen gemacht hatte, schien die Äthertheorie, die Bewegungstheorie der Elektrizität, unzweifelhaft den Sieg davongetragen zu haben. Die sogenannte *Maxwell*sche Theorie, die alle elektrischen Erscheinungen als Zustands- oder Bewegungserscheinungen des Äthers auffaßte, schien damals die unzweifelhafte, vollkommenste Theorie der Elektrizität zu sein.

So schien es. Aber bei näherer Betrachtung blieben doch auch bei ihr eine Reihe von wichtigen Erscheinungen unerklärt, gerade solche Erscheinungen, welche hinwiederum durch die Annahme einer stofflichen Natur der Elektrizität sich sehr einfach auffassen ließen. Insbesondere waren es die Erscheinungen der *Elektrolyse*, welche bekanntlich von *Faraday* erforscht und gesetzmäßig festgelegt waren, die durch die *Maxwell*sche Theorie nicht erklärt werden konnten, und welche dagegen die Elektrizität als stofflich erscheinen ließen.

Bei dem Durchgang eines elektrischen Stromes durch eine zusammengesetzte leitende Flüssigkeit (eine Lösung von Salzen oder Säuren oder Basen in Wasser) wird diese bekanntlich zersetzt, elektrolysiert, so zwar, daß von dem gelösten Salz oder der gelösten Säure oder Base das Metall (bzw. der Wasserstoff) an dem negativen Pol, der negativen Elektrode, der *Kathode*, frei auftritt, der Rest des Moleküls aber an der positiven Elektrode, der *Anode*. Die beiden Bestandteile des Moleküls, die hierbei getrennt auftreten, und die sich als elektrisch geladene Bestandteile erweisen, nennt man bekanntlich ihre *Ionen*, und bezeichnet als *Kation* das an der negativen Elektrode, als *Anion* das an der positiven Elektrode auftretende Ion. Die Untersuchung der genauen quantitativen Erscheinungen bei der Elektrolyse führte *Faraday* zu dem

Gesetz, daß das Gewicht, die Masse der Ionen, die bei der Elektrolyse irgend einer Flüssigkeit an der einen oder der anderen Elektrode abgeschieden wird, proportional ist dem Produkt aus dem Äquivalentgewicht der betreffenden Substanz und der gesamten Elektrizitätsmenge, welche während der Stromdauer durch die Flüssigkeit hindurchgegangen ist:

Die Masse der abgeschiedenen Ionen ist proportional:
Äquivalentgewicht des Ions × durchgegangene Elektrizitätsmenge.

Die Äquivalentgewichte der elementaren Stoffe sind bekanntlich ihre Atomgewichte, dividiert durch ihre Wertigkeit. Wasserstoff hat das Äquivalentgewicht 1, der zweiwertige Sauerstoff das Äquivalentgewicht $\frac{16}{2} = 8$, der dreiwertige Stickstoff das Äquivalentgewicht $\frac{14}{3} = 4{,}66$, der vierwertige Kohlenstoff das Äquivalentgewicht $\frac{12}{4} = 3$.

Die gesamte Masse der abgeschiedenen Ionen, dividiert durch das Äquivalentgewicht derselben, ist aber nichts anderes als die *Zahl* der abgeschiedenen Äquivalente. Drückt man die ganze abgeschiedene Masse in Grammen aus, so erhält man die Zahl der abgeschiedenen *Grammäquivalente*, wobei ein Grammäquivalent eines Stoffes so viel Gramm ist, als das Äquivalentgewicht angibt. Sind z. B. bei der Elektrolyse 10 Gramm Sauerstoff abgeschieden, so sind das $\frac{5}{4}$ Grammäquivalente Sauerstoff. Das *Faraday*sche Gesetz läßt sich daher auch so ausdrücken:

die Zahl der abgeschiedenen Äquivalente ist proportional der durchgegangenen Elektrizitätsmenge

oder umgekehrt,

die durchgegangene Elektrizitätsmenge ist proportional der Zahl der abgeschiedenen Äquivalente.

Die Stromleitung in einer Flüssigkeit läßt sich so auffassen — und viele Experimente beweisen das — daß innerhalb der Flüssigkeit die Ionen beider Arten schon von vornherein in sehr großer Zahl frei vorhanden sind, jedoch so, daß in dem kleinsten Raum gleich viel positive und negative Ionen sich befinden. Werden nun in die Flüssigkeit zwei Elektroden eingetaucht und mit der Stromquelle verbunden, so wandern durch elektrostatische Anziehung die positiven Ionen in der Richtung zur Kathode, die negativen Ionen in der Richtung nach der Anode. Diejenigen positiven oder negativen Ionen, die jedesmal der Kathode oder Anode am meisten benachbart sind, scheiden sich an ihr ab, während im Innern der Flüssigkeit immer gleichviel positive und negative Ionen bleiben. Aus diesem Vorgang erkennt man aber, daß jedes abgeschiedene Ion vorher einen Teil der Stromleitung besorgt hat. Die Leitung durch die Flüssigkeit kommt immer durch die *Wanderung der Ionen* zustande und diese

Ionen sind eben positiv oder negativ geladene Teile von Molekülen. Jedes abgeschiedene Äquivalent eines Stoffes war also vorher ein wanderndes Äquivalent und führte eine bestimmte Elektrizitätsmenge mit sich. Dann aber sagt das *Faraday*sche Gesetz auch aus, *da es nur von der Zahl, nicht aber von der Art der Äquivalente* spricht, daß jedes Äquivalent irgend einer Substanz mit ein und derselben Elektrizitätsmenge verbunden ist, und zwar mit einer positiven, wenn es Kation, mit einer negativen, wenn es Anion ist. Jedes einwertige Atom, wie das des Wasserstoffs, Silbers, Chlors usw., ist danach mit einer ganz bestimmten Elektrizitätsmenge verbunden, jedes zweiwertige Atom, wie das des Kupfers, Zinks, Sauerstoffs mit der doppelten, jedes drei- und vierwertige mit der drei- und vierfachen.

Es war zuerst *Helmholtz*, der aus diesen Tatsachen (1881) einen hochbedeutsamen Schluß zog. Die einfachste Interpretation nämlich des eben ausgesprochenen Gesetzes ist die, daß *eben so wie die Materie auch die Elektrizität atomistisch zerteilt ist*, daß mit jedem Äquivalent eines beliebigen Stoffes eine ganz bestimmte Elektrizitätsmenge, und zwar immer dieselbe, welches auch der Stoff sei, verbunden ist. Es gibt eine gewisse kleinste Elektrizitätsmenge, welche mit jedem Atom eines einwertigen Stoffes verbunden ist. Von dieser kleinsten Elektrizitätsmenge kann ein anderer, mehrwertiger Stoff pro Atom nicht etwa das $1^1/_2$fache oder das $3^1/_4$fache enthalten, sondern nur das 2fache, 3fache usw. Die Elektrizität scheint danach also ein Stoff zu sein, der ebenfalls in kleinste, diskrete Teile, in Atome geteilt ist. Diese Atome der Elektrizität nennt man *Elektronen* und unterscheidet zunächst positive und negative Elektronen. Die Elektrizität verhält sich demnach wie ein besonderes chemisches Element, dessen Atome sich mit denen der anderen bekannten Elemente verbinden, nämlich zu Ionen. Und zwar ist dieser Stoff ein *einwertiger*. Denn jedes einwertige Atom verbindet sich mit *einem* Elektron, jedes zweiwertige mit *zweien* usf., ganz so wie sich ein Chloratom mit *einem* Atom Wasserstoff verbindet, ein Sauerstoffatom mit *zwei* Atomen Wasserstoff usw.

So wurde zum ersten Male durch *Helmholtz* die präzisierte Vorstellung in die Physik eingeführt, daß die Elektrizität selbst ein Stoff, und zwar ein atomistisch-geteilter Stoff sei, also eine Vorstellung, welche der *Maxwell*schen Theorie durchaus widersprach. Da aber anderseits eine große Anzahl von elektrischen Erscheinungen sich nach der *Maxwell*schen Theorie durch Bewegungen des Äthers einfach und vollständig erklären ließen, so klaffte hier wiederum ein scheinbar unüberbrückbarer Abgrund zwischen den verschiedenen Erscheinungsformen der Elektrizität. Dieser Widerspruch wurde aber gelöst, die getrennten Auffassungen wurden zu einer Zusammenfassung, einer höheren Synthese gebracht, durch die von *H. A. Lorentz* (1892) aufgestellte *Elektronentheorie der Elektrizität*. *Lorentz* zeigte nämlich, daß alle Wirkungen der Elektrizität *innerhalb* der Körper sich durch die atomistische Stofftheorie, durch die Annahme von Elektronen, daß dagegen alle Wirkungen der Elektrizität in die *Ferne*, die elektrostatischen, die elektromagnetischen, die Induktionswirkungen, sich nur durch Zuhilfenahme des Äthers erklären ließen. Und die Vereinigung dieser beiden Klassen von Erscheinungen geschah durch ihn in der Weise, daß er zeigte, daß jedes Elektron in einer engen Verknüpfung mit dem Äther steht, daß jedes ruhende und ebenso jedes bewegte Elektron in

dem Äther ganz bestimmte Veränderungen hervorbringt, die sich dann eben durch den Äther fortpflanzen — und zwar mit Lichtgeschwindigkeit — und so die Fernwirkungen hervorbringen. Die nähere Ausführung dieser Elektronentheorie ist für unsere Zwecke nicht nötig. *Für uns ist es dagegen von besonderer Wichtigkeit, daß wir nun außer den Atomen der chemisch bekannten Elemente noch zwei weitere Atome, die der positiven und der negativen Elektrizität, in unsere Betrachtungen einführen müssen.* Zwar ist diese Annahme bisher nur aus verwickelten und ziemlich unübersichtlichen Tatsachen geschlossen, und es scheinen die angenommenen Atome der Elektrizität immer nur mit Atomen der gewöhnlichen Stoffe verbunden vorzukommen. Aber wir werden bald weitere Erscheinungen besprechen, aus denen wir erkennen werden, daß diese Elektronen unter Umständen auch frei für sich, ohne Verbindung mit anderer Materie auftreten können, so daß ihre Existenz nicht mehr bloß durch eine schwierige Interpretation verwickelter Erscheinungen geschlossen werden muß.

Um diese Betrachtungen vollständig zu machen und damit auch die Grundlage für die späteren Verallgemeinerungen zu legen, müssen wir nun die aus dem *Faraday*schen Gesetz sich ergebenden Folgerungen nicht bloß allgemein qualitativ, sondern quantitativ nach Maß und Zahl besprechen.

Wir hatten oben den Satz ausgesprochen:

Die durchgegangene Elektrizitätsmenge ist proportional der Zahl der abgeschiedenen Äquivalente,

welchen Satz wir in anderer Fassung auch so ausdrückten:

Jedes Äquivalentgewicht eines Stoffes ist, unabhängig von der Art des Stoffes, mit einer bestimmten Elektrizitätsmenge verbunden.

Da die Äquivalentzahlen der Elemente zunächst relative Zahlen sind, bezogen auf das Äquivalentgewicht des Wasserstoffs gleich 1, so können wir unsere erste quantitative Frage so stellen: *Wie groß ist die Elektrizitätsmenge, die mit einem Grammäquivalent irgend eines Stoffes verbunden ist?*

Zur Beantwortung dieser Frage müssen wir zunächst festsetzen, in welchen Einheiten wir die Elektrizitätsmengen messen. In der elektrischen Praxis gilt diejenige Elektrizitätsmenge als die Einheit, welche von dem Strom 1 Ampere in jeder Sekunde durch jeden Querschnitt eines Stromkreises hindurchgeschickt wird. Diese Einheit der Elektrizitätsmenge nennt man 1 *Coulomb*. Für manche wissenschaftlichen Rechnungen aber ist es bequemer, diejenige Elektrizitätsmenge als die Einheit zu nehmen, welche auf eine gleich große in der Entfernung 1 cm befindliche, eine elektrostatische Anziehungs- oder Abstoßungskraft ausübt (je nachdem die zweite ungleichnamig oder gleichnamig ist), die, gleich der Einheit der Kraft, 1 Dyne ist. Diese letztere Einheit hat man, weil sie praktisch weniger gebraucht wird, nicht mit einem besonderen einfachen Namen bezeichnet. Man nennt sie die *elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge*. Sie ist viel kleiner als 1 Coulomb, und genaue Versuche haben gelehrt, daß 1 Coulomb dreitausend Millionen ($3 \cdot 10^9$) elektrostatische Einheiten enthält. Durch diese Angabe kann man also einfach von einer Elektrizitätsmenge in Coulomb übergehen zu der in elektrostatischen Einheiten ausgedrückten oder umgekehrt.

Wir wollen zunächst die Elektrizitätsmengen in Coulomb gemessen denken. Dann beantwortet sich die oben aufgestellte quantitative Frage durch folgenden

Versuch, der von Lord *Rayleigh* und Mrs. *Sidgwick* in England (1884) und von *F.* und *W. Kohlrausch* in Deutschland (1886) mit der allergrößten Präzision und mit genau demselben Resultat ausgeführt wurde und der die Grundlage für die internationale Festsetzung der Stromeinheit, 1 Ampere, geworden ist:

Sendet man durch eine Lösung von salpetersaurem Silber die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb hindurch, so werden an der Kathode 0,001118 Gramm Silber abgeschieden. Das heißt nach unserer obigen Erörterung, daß 0,001118 Gramm Silber mit 1 Coulomb verbunden sind. Folglich ist 1 Grammäquivalent Silber (107,88 Gramm Silber) verbunden mit

$$\frac{107{,}88}{0{,}001118} = 96\,494 \text{ Coulomb.}$$

Dieselbe Anzahl von Coulomb ist nach dem *Faraday*schen Gesetz verbunden mit einem Grammäquivalent jedes anderen Stoffes, also mit 1 Gramm Wasserstoff, mit 35,5 Gramm Chlor, mit 8 Gramm Sauerstoff, mit 31,78 Gramm des zweiwertigen Kupfers, mit 9,03 Gramm des dreiwertigen Aluminiums usw.

Daraus sieht man sofort, daß mit 1 Gramm der verschiedenen Stoffe sehr verschiedene Elektrizitätsmengen verbunden sind, nämlich um so kleinere, je größer das Äquivalentgewicht ist. *Man bezeichnet die mit 1 Gramm eines Stoffes verbundene Elektrizitätsmenge als die spezifische Ladung des betreffenden Stoffes.* Sie ist auch gleich dem Verhältnis der Ladung (Elektrizitätsmenge) zu der Masse des betreffenden Stoffes. Aus den obigen Zahlen ergibt sich, daß die spezifische Ladung des Wasserstoffs, des Elementes mit dem kleinsten Äquivalentgewicht, gleich $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ ist. Dagegen die des Sauerstoffs ist $\frac{96\,494}{8} = 12\,062 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$, die des Chlors $\frac{96\,494}{35{,}5} = 2718 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$, die des Silbers $\frac{96\,494}{107{,}88} = 894{,}4 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ usw.

Die spezifische Ladung irgend einer Masse bei der Elektrolyse ist höchstens gleich 96 494 $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$. *Und zwar hat sie diesen Wert für den Wasserstoff. Für alle anderen Elemente ist sie kleiner als 96 494* $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$, *und zwar um so kleiner, je größer das Äquivalentgewicht des betreffenden Elementes ist.*

Aus diesem Satz werden wir später eine wichtige Folgerung ziehen. Unsere obige Berechnung erlaubt uns aber noch einen großen Schritt weiter zu gehen. Da jedes einwertige Ion mit einer bestimmten Ladungsmenge versehen ist, nämlich mit der Ladung *eines Elektrons*, so können wir nun auch die Größe dieser Ladung bestimmen. Ein Grammäquivalent Wasserstoff, d. h. 1 Gramm Wasserstoff ist mit 96 494 Coulomb verbunden. Nun enthält ein Grammmolekül Wasserstoff, d. h. 2 Gramm Wasserstoff (nach S. 11) $60{,}9 \cdot 10^{22}$ Moleküle (die *Avogadro*sche Zahl), also 1 Gramm Wasserstoff ebensoviel Atome

bzw. Ionen. Folglich enthält jedes Ion des Wasserstoffs (und ebenso auch ein Ion jedes anderen einwertigen Stoffes) eine Ladung

$$\frac{96\,494}{60{,}9 \cdot 10^{22}} = 1{,}58 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb.}$$

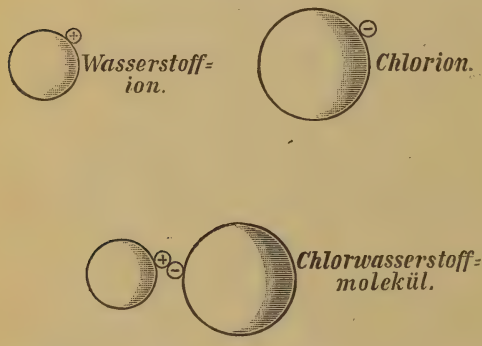
Wir drücken diese Zahl lieber in elektrostatischen Einheiten aus, indem wir sie mit $3 \cdot 10^9$ multiplizieren und erhalten so

$$4{,}74 \cdot 10^{-10} \text{ elektrostatische Einheiten.}$$

Diese Zahl nennt man die *elektrische Elementarladung* oder das *elektrische Elementarquantum*. Sie ist offenbar die Ladung eines einzigen Elektrons, also die kleinste elektrische Ladung, die überhaupt existiert. Irgend ein geladener Körper kann nur eine ganze Anzahl von diesen Elementarquanten besitzen, aber nicht eine ganze Anzahl plus einem Bruchteil derselben. Da jedoch dieses Elementarquantum so klein ist, daß es mit unseren feinsten Meßinstrumenten nicht erkannt werden kann, so läßt sich diese Folgerung nicht direkt prüfen.

Die bildliche Vorstellung, die man sich nach dem Bisherigen von einem positiven oder negativen Ion machen kann, ist etwa durch Fig. 2 dargestellt. Die Elektronen sind durch kleine Kreise dargestellt, die mit + und — bezeichnet sind, und ein Wasserstoffion besteht aus einer Verbindung eines Wasserstoffatoms mit einem positiven Elektron, ein Chlorion ebenso aus der Verbindung eines Chloratoms mit einem negativen Ion. Die Verbindung von Chlor und Wasserstoff zu einem Chlorwasserstoffmolekül kann man sich auch in dieser Weise wie in Fig. 2 durch das Zusammentreten eines positiven und eines negativen Ions verständlich machen. Nicht aber kann man so die Verbindung zweier Wasserstoffatome zu einem Wasserstoffmolekül verstehen. Denn jedes Wasserstoffion ist bei der Elektrolyse immer nur positiv geladen, und zwei positive Ladungen ziehen sich nicht an, sondern stoßen sich ab.

Fig. 2.



Obwohl nun hier, bei den Erscheinungen der Elektrolyse zum ersten Male die atomistische Struktur der Elektrizität zutage trat, muß man doch zugeben, daß die Erscheinungen recht kompliziert sind und daß man nicht durchaus sicher sein kann, ob diese Erklärung, wenn sie auch verhältnismäßig einfach ist, auch wirklich stichhaltig ist und weiterer Prüfung standhält.

Wesentlich neue Einsichten aber und dabei eine Bestätigung und Weiterführung unserer Elektronenvorstellung gewann man durch die Beobachtung des Durchgangs der Elektrizität durch *sehr verdünnte Gase*. Wenn man in ein Glasgefäß zwei Metallplatten oder Metalldrähte, die Elektroden, einschmilzt und das Gas in dem Gefäß durch eine Luftpumpe auf etwa 0,01 mm Druck oder noch weiter verdünnt, so treten bekanntlich, wenn man die Elektroden

mit einer Elektrizitätsquelle von hoher Spannung verbindet — einem Induktionsapparat oder einer Influenzmaschine oder einem Hochspannungsakkumulator —, in dem Gefäß sehr merkwürdige und charakteristische Erscheinungen auf, die man als *Kathodenstrahlen* bezeichnet. Es bleibt nämlich das Innere des Gefäßes bei dieser Verdünnung fast vollständig lichtlos, aber man erkennt, daß das Glas der Röhre *grün* fluoresziert, und zwar am stärksten an den Stellen, welche der negativen Elektrode, der Kathode, gerade gegenüberliegen. Diese Fluoreszenz kommt daher, wie die folgenden Versuche lehren, daß von der Kathode aus unsichtbare Strahlen geradlinig fortgehen und da, wo sie auf ein Hindernis, wie das Glas der Röhre, treffen, besondere Wirkungen, hier Erregung von Fluoreszenz, hervorbringen. Daß diese Strahlen nur geradlinig fortgehen — deswegen spricht man eben von Strahlen — und nicht um Ecken umbiegen und nur von der Kathode fortgehen, erkennt man sofort, wenn man eine V-förmige Röhre wie Fig. 3 benutzt. Macht man in dieser L zur Kathode und M zur Anode, so sieht man nur den linken Schenkel des Glases bis zur Biegung grün leuchten, den rechten nicht. Macht man umgekehrt M zur Kathode und L zur Anode, so fluoresziert der rechte Schenkel. Die Kathodenstrahlen gehen eben nicht durch die Biegung des Rohres von der Kathode zur Anode, sondern nur geradlinig von der Kathode fort. Die absolute Geradlinigkeit ihrer Ausbreitung wird auch sehr scharf bewiesen durch eine Röhre wie die in Fig. 4. In dieser Röhre ist der Kathode a gegenüber ein Kreuz b aus Metall im Innern befestigt. Die Kathodenstrahlen gehen von a aus geradlinig fort und erregen das Glas der Röhre, wo sie es treffen, zur grünen Fluoreszenz. Durch das Metallkreuz aber werden sie abgehalten und man sieht daher auf der grün leuchtenden Wand der Röhre bei d ein ganz scharfes Schattenbild des Kreuzes.

Fig. 3.

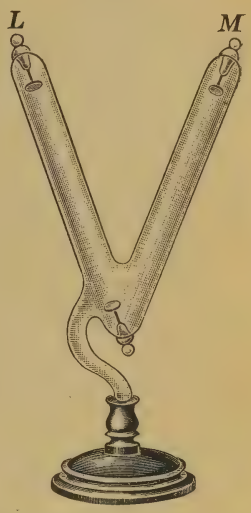
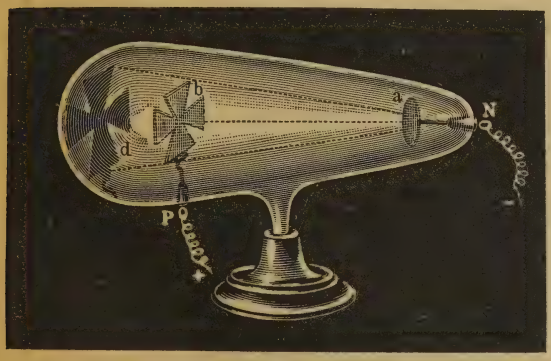


Fig. 4.

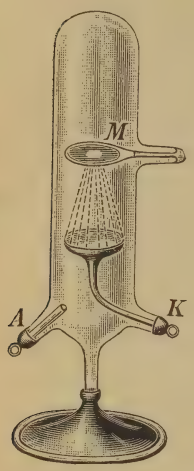


Nicht alle Gläser leuchten grün; Bleigläser leuchten blau, Didymgläser rot. Ebenso wie das Glas kommen eine Menge anderer Körper, namentlich Mineralien, wenn sie von Kathodenstrahlen getroffen werden, zum fluoreszierenden Leuchten.

Von der Lage der Anode ist der Gang der Kathodenstrahlen ganz unabhängig. Diese kann seitlich, vor oder hinter der Kathode angebracht sein, die

Kathodenstrahlen gehen ganz geradlinig von der Kathode fort, und zwar senkrecht zu ihr. Macht man die Kathode kugelförmig, hohlspiegelartig, so treffen sich daher die Kathodenstrahlen im Mittelpunkt der Kugel, den man dann den *Fokus* oder *Brennpunkt* nennt, und gehen von ihm aus weiter auseinander.

Fig. 5.

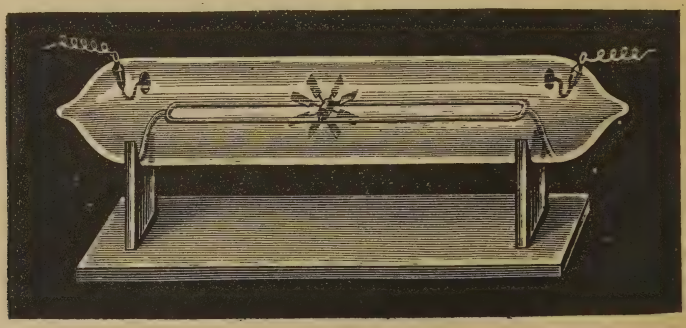


Metallische Körper fluoreszieren nicht. Dagegen kann man an ihnen leicht zeigen, daß die Kathodenstrahlen die Körper, auf die sie treffen, erhitzen. In Fig. 5 ist in der Röhre bei K eine hohlspiegelartige Kathode eingeschmolzen, und deren Brennpunkt fällt auf ein dünnes Metallblech, M, das dort in der Röhre angebracht ist. Sobald die Kathodenstrahlen erregt werden, fängt das Metallblech in der Mitte an zu glühen. Läßt man die Kathodenstrahlen von einer hohlspiegelartigen Kathode auf das Glas der Röhre fallen, so daß der Brennpunkt am Glase liegt, so wird das Glas rasch weich und dann von dem äußeren Luftdruck durchbrochen, so daß die Röhre vernichtet wird.

Leicht bewegliche Körper im Innern eines Rohrs werden durch die Kathodenstrahlen bewegt. In Fig. 6 ist ein leichtes Rad mit Glimmerflügeln auf zwei Glasschienen beweglich. Sobald die Kathodenstrahlen von links oder von rechts auf die Flügel fallen, dreht sich das Rad nach rechts oder links und schreitet auf den Schienen fort.

Diese Eigenschaften der Kathodenstrahlen führten schon den englischen Physiker *Crookes* dazu, anzunehmen, daß in einer solchen Röhre die Ga moleküle rasch von der Kathode fortgeschleudert werden, und daß durch den Anprall dieser Moleküle an die Wände Erhitzung erzeugt, bzw. Erschütterung der Teilchen hervorgebracht wird, die sich in dem fluoreszierenden Leuchten äußert. *Crookes* sprach von einem „*Bombardement der Moleküle*“, welches die Ursache

Fig. 6.

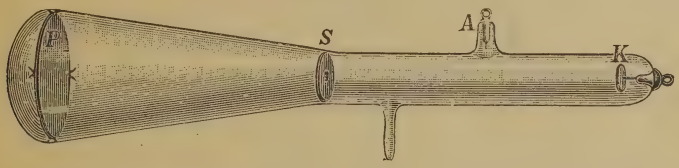


für das Fluoreszieren und die Wärmeentwicklung sei. Durch den Stoß dieser rasch bewegten Teile erkläre sich ebenso die Bewegung leichter Körper im Innern der Röhre.

Aber was sind das für Teilchen, die in der Röhre sich rasch bewegen? Daß es nicht, wie *Crookes* annahm, die Gasmoleküle selbst sein können, wird durch

eine weitere, sehr überraschende Eigenschaft der Kathodenstrahlen bewiesen. Die Kathodenstrahlen werden nämlich von einem Magneten stark von ihrer Bahn abgelenkt. Man kann, um das zu zeigen, sich einer Röhre von der Form Fig. 7, einer sogenannten *Braun*schen Röhre, bedienen. In dieser ist bei K die Kathode, bei A die Anode. Die Kathodenstrahlen gehen von K geradlinig fort, und um ein ganz schmales Bündel von ihnen zu erhalten, fallen sie bei S auf ein Diaphragma aus Glas oder Metall, das in der Mitte ein kleines Loch enthält. Durch dieses Loch schreiten sie hindurch und fallen auf einen Schirm P aus Kalziumwolframat, welche Substanz durch sie zum hellen, blauen Fluoreszieren gebracht wird. Man sieht also auf diesem Schirm in der Mitte einen kleinen kreisförmigen, blauen Fleck am Auffallspunkt der Kathodenstrahlen. Wenn man nun aber in die Nähe des Diaphragmas S einen Pol eines Magnetstabs bringt, z. B. den Nordpol, so sieht man, daß der blaue Fleck sich stark verschiebt, daß also die Kathodenstrahlen von ihrer geraden Bahn abgelenkt werden. Bringt man den Nordpol oben an die Röhre, so wird der blaue Fleck nach hinten, bringt man ihn unten an, so wird er nach vorn, hält man ihn seitlich vorn an die Röhre, so wird der Fleck nach oben verschoben, und wenn

Fig. 7.



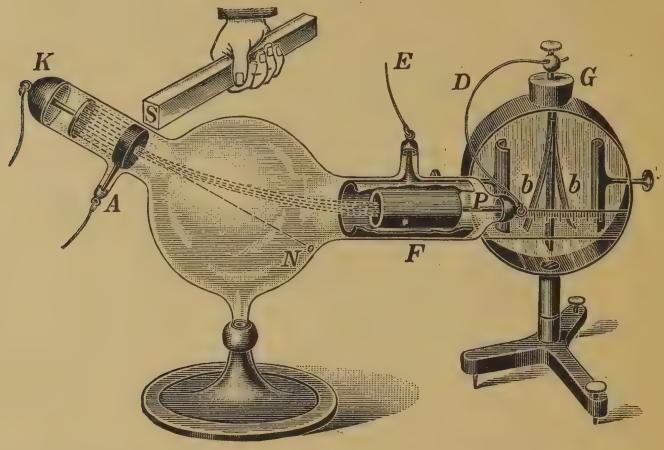
man den Magnetpol seitlich hinten an die Röhre bringt, so wird der Fleck nach unten verschoben. Die Kathodenstrahlen erleiden dieselbe Ablenkung durch den Magneten, wie sie ein elektrischer Strom erfahren würde, der *zur Kathode* hinfließt. Übrigens findet man, daß nach der Ablenkung der Fleck nicht mehr rund, sondern stark in die Länge gezogen ist, woraus folgt, daß in dem Kathodenstrahl verschiedene Teile vorhanden sind, solche, welche von dem Magneten stärker und solche, welche von ihm schwächer abgelenkt werden.

Nach diesem Versuch können es nicht die Gasmoleküle sein, die in den Kathodenstrahlen fliegen; denn Gasmoleküle sind neutral und werden nicht von einem Magneten beeinflußt. Wenn die ganze Vorstellung von den bewegten Teilen richtig ist, so müßten es vielmehr elektrische, *negativ geladene* Teile sein, die sich in den Kathodenstrahlen bewegen, denn nur solche würden eine Ablenkung nach der Richtung erfahren, wie wir sie oben gefunden haben.

Es läßt sich nun aber in der Tat auch direkt nachweisen, daß die Kathodenstrahlen negative Ladung mit sich führen. Zu diesem Zwecke benützen wir die Röhre Fig. 8. In dieser ist K die Kathode, A die Anode, die zugleich ein Diaphragma mit einem kleinen Loch bildet, so daß die Kathodenstrahlen direkt nach der Stelle N fallen. Durch den Magnetstab S lenkt man die Kathodenstrahlen ab, so daß sie in das Ansatzrohr fallen, in welchem ein äußeres, mit der Erde durch E verbundenes Metallgefäß und ein inneres mit P verbundenes Metallgefäß sich befinden. Diese Metallgefäße nennt man einen *Faradayschen Käfig*. Mit P ist nun durch den Draht D ein Goldblattelektroskop G verbunden,

und sobald die Kathodenstrahlen in den Käfig fallen, sieht man sofort die Blättchen des Elektroskops sich spreizen, ein Beweis, daß sie elektrisch geladen werden. Und durch Prüfung dieser Ladung (mit einem geriebenen Glasstab)

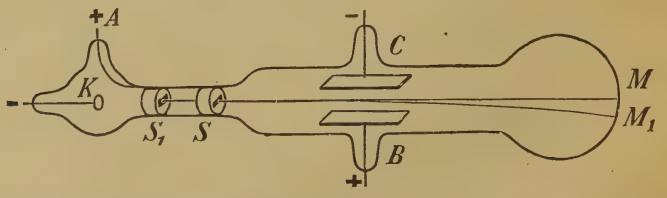
Fig. 8.



erkennt man, daß sie negativ ist. Damit ist bewiesen, daß es *negativ elektrisch geladene Teilchen sind, die in den Kathodenstrahlen fliegen.*

Daraus erklärt sich auch folgender wichtige Versuch, der, wie wir sehen werden, eine quantitative Messung erlaubt. In Fig. 9 ist eine Röhre von der Form der *Braun*schen Röhre abgebildet, nur daß in dieser noch 2 Metallplatten B und C sich befinden, die zusammen einen Kondensator bilden. Man kann C mit dem negativen, B mit dem positiven Pol (oder umgekehrt) einer Stromquelle von 100 oder 200 Volt Spannung verbinden. Die Kathodenstrahlen gehen von K aus, fallen durch die beiden Diaphragmen S_1 und S und erzeugen hinten bei M auf dem Fluoreszenzschirm einen blauen Fleck, solange der Kondensator ungeladen ist. Wird dieser aber in der angegebenen Weise geladen; so verschiebt sich der Fleck nach unten hin, nach M_1, weil die negativ geladenen Teile der Kathodenstrahlen von der positiven Platte B angezogen

Fig. 9.



werden. Die Kathodenstrahlen erfahren, wie man sagt, eine *elektrostatische Ablenkung.*

Es sind also sicher negativ geladene Teilchen, die in den Kathodenstrahlen fliegen, und die Vermutung liegt nahe, daß man es hier ebenso wie in der

Elektrolyse mit *Ionen* zu tun hat, d. h. mit elektrisch geladenen Atomen. Wenn das der Fall ist, dann muß (nach S. 19) die *spezifische Ladung* dieser Teile kleiner oder höchstens gleich 96 494 $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ sein und aus dem Wert, den die spezifische Ladung, wenn man sie bestimmen kann, wirklich besitzt, könnte man das Äquivalentgewicht des Stoffes bestimmen, der die Ladung trägt, könnte also den Stoff selbst ermitteln.

Die Frage ist also, welches ist die spezifische Ladung der Teilchen, die in den Kathodenstrahlen fliegen, und eine weitere Frage ist, welche Geschwindigkeit besitzen diese Teilchen?

Diese beiden Fragen lassen sich aber durch quantitative Verfolgung der obigen Experimente beantworten, nämlich durch die Messung der Größe der magnetischen Ablenkung und durch die Messung der elektrostatischen Ablenkung. Bei der elektrostatischen Ablenkung verhält sich ein horizontal fliegendes Teilchen, das eine unbekannte Masse und eine unbekannte Ladung besitzt, sobald es in das von oben nach unten gerichtete elektrostatische Feld kommt, wie ein horizontal geworfener Stein, der von der Erde abgelenkt wird. Aus der Größe der Ablenkung, der Länge des Kondensators und der Größe der elektrischen Kraft, die in ihm herrscht, ergeben sich die beiden unbekannten Größen, spezifische Ladung und Geschwindigkeit, in der Kombination: spezifische Ladung dividiert durch das Quadrat der Geschwindigkeit.

Untersucht man anderseits die magnetische Ablenkung, so ergibt sich aus der Krümmung des Kathodenstrahles und aus der Stärke des Magnetfeldes die Kombination: spezifische Ladung dividiert durch die Geschwindigkeit selbst. Man erkennt, daß man durch diese beiden Messungen die beiden unbekannten Größen des Problems bestimmen kann, nämlich 1. die Geschwindigkeit der Teilchen im Kathodenstrahl, 2. die spezifische Ladung derselben.

Was nun erstens die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen betrifft, so erwies sich diese immer als außerordentlich groß, etwa 100 000 Kilometer pro Sekunde, also ungefähr $^1/_3$ Lichtgeschwindigkeit. Aber diese Geschwindigkeit zeigte sich sehr verschieden, je nachdem die Röhre stärker oder weniger stark ausgepumpt war, also auch, ob sie mit höherer oder geringerer Spannung betrieben werden mußte. Bei sehr stark evakuierten Röhren war die Geschwindigkeit größer (während bei ihnen die magnetische Ablenkung kleiner war), bei weniger evakuierten Röhren war die Geschwindigkeit kleiner, aber die magnetische Ablenkung größer. Die Werte, die man so für die Geschwindigkeit in Röhren verschiedener Luftleere fand, variierten zwischen $^1/_5$ und $^1/_3$ Lichtgeschwindigkeit.

Im Gegensatz dazu ergab sich der Wert der *spezifischen Ladung* der Kathodenstrahlen bei Röhren aller Art, weniger oder stärker ausgepumpten, immer als derselbe. Und dabei zeigte sich eine große Überraschung. Während man nämlich aus den Kenntnissen der Elektrolyse erwarten mußte, daß die spezifische Ladung *höchstens* sich gleich 96 494 Coulomb pro Gramm ergeben könnte, zeigte es sich, daß sie hier fast 1900mal größer war. Sie ergab sich zu

177 000 000 $(1{,}77 \cdot 10^8)$ $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$.

Daraus würde man zunächst schließen müssen, daß die elektrische Ladung hier verbunden ist mit dem Atom eines Stoffes, dessen Äquivalentgewicht bloß der 1900. Teil desjenigen des Wasserstoffs ist, daß also überraschenderweise in diesen Röhren sich die Existenz einer ganz neuen Materie kundgibt, die 1900mal leichter ist als die bisher leichteste Materie, der Wasserstoff.

Aber dieser seltsame Schluß hält genauerer Betrachtung gegenüber nicht stand. Es erwies sich nämlich als ganz einflußlos, ob das verdünnte Gas in der Röhre Luft oder Wasserstoff oder Helium oder Sauerstoff oder irgend ein anderes Gas ist, immer ergab sich derselbe Wert der spezifischen Ladung. Da man nun nicht annehmen kann, daß man bei allen den verschiedenen Gasen immer dieselbe Beimengung eines neuen unbekannten Gases habe und daß dieses allein der Träger der Kathodenstrahlen sei, so ist man zu dem Schluß genötigt, daß die Kathodenstrahlen elektrische Ladungen sind, welche gar nicht an eine fremde Masse gebunden sind, sondern daß man es hier mit den *freien negativen Elektronen* selbst zu tun habe, daß diese Elektronen es sind. welche die Kathodenstrahlen bilden.

Danach wären die negativen Elektronen kleine Körperchen, die die elektrische Elementarladung besitzen und deren Masse bloß etwa der 1900. Teil, genauer der 1835. Teil der Masse des Wasserstoffatoms wäre. Aber sie wären materielle Körper wie der Wasserstoff.

Indes zeigt eine weitere Überlegung und zeigen weitere Erfahrungen, daß sie nicht materielle Körper wie der Wasserstoff sind. Es läßt sich nämlich beweisen, daß sie gar keine wirkliche Masse haben, sondern daß ihre Masse nur *scheinbar* ist.

Um diese etwas schwierige Frage zu erörtern, müssen wir untersuchen, woher wir denn eigentlich zu der Behauptung kommen, daß ein Körper *Masse* besitzt. Dies schließen wir aus zwei Erfahrungen. Erstens erkennen wir, daß alle Körper von der Erde angezogen werden und daher Gewicht besitzen und dieses Gewicht fühlen wir beim Aufheben der Körper. Die Masse aller unserer irdischen Körper ist also der Schwerkraft unterworfen, sie ist *schwere Masse.* Wenn aber die Schwerkraft nicht vorhanden wäre (wir können sie uns ja in Gedanken fortgenommen vorstellen, oder wir können uns einen Körper in die Verbindungslinie zwischen Mondmittelpunkt und Erdmittelpunkt gebracht denken, 45 700 Meilen von der Erdoberfläche entfernt, wo die Erdanziehung nicht auf ihn wirkt, weil sie durch die Mondanziehung aufgehoben wird), würden wir dann auch noch Erfahrungen haben, durch welche wir den Körpern den Besitz von Masse zuschreiben würden? Zweifellos, und zwar aus folgenden Gründen. Um einen Körper von der Ruhe aus in Bewegung zu setzen, brauchen wir eine erhebliche Kraft. Man erkennt das jedesmal, wenn z. B. ein Pferd einen Wagen anzieht. Ist der Körper einmal in Bewegung mit gleichbleibender Geschwindigkeit, so brauchen wir eine viel geringere Kraft (wenn keine Reibung vorhanden wäre, gar keine Kraft), um diese Bewegung zu erhalten. Also die Bewegung von der Ruhe aus (oder allgemeiner die Beschleunigung eines Körpers) erfordert Kraft. Umgekehrt, wenn wir einen Körper durch eine Kraft in Bewegung gehalten haben und nun die Kraft plötzlich aufhören lassen (z. B. wenn ein Motorführer bei der elektrischen Trambahn den Strom plötzlich ausschaltet), so kommt der Körper nicht sofort in Ruhe, sondern

bewegt sich mit derselben Geschwindigkeit weiter, und zwar beliebig lange (wenn keine Reibung vorhanden wäre, die die Geschwindigkeit allmählich vernichtet). Diese beiden Eigenschaften jedes Körpers beruhen darauf, daß er eben Masse besitzt, und man bezeichnet sie als Wirkungen der Trägheit. Die Masse jedes Körpers ist also *träge Masse. Aus der Trägheit erkennt man die Masse, die Trägheit ist für uns das Kennzeichen der Masse.*

Nun können wir aber einsehen, daß ein bewegtes Elektron bloß wegen seiner Ladung auch die Erscheinungen der Trägheit zeigt, selbst wenn es gar nicht mit einer Masse verbunden ist. Eine bewegte Ladung nämlich, ein bewegtes Elektron, ist ein elektrischer Strom. Aus den von *Faraday* entdeckten Erscheinungen der Induktion wissen wir aber, daß stets, wenn ein Strom zu fließen beginnt, also wenn das Elektron in Bewegung kommt, daß dann vermöge der magnetischen Kräfte, die sich durch den umgebenden Äther ausbreiten, ein *Extrastrom* entsteht, der dem ursprünglichen Strom entgegenwirkt. Es gehört also eine Kraft dazu, um das Elektron in Bewegung zu setzen. Umgekehrt, wenn ein Strom plötzlich geöffnet wird, so entsteht aus demselben Grunde ein Extrastrom, der die Bewegung fortzusetzen sucht. Das Elektron bewegt sich also weiter, auch wenn die Kraft, die es in Bewegung hielt, aufhört. Diese beiden durch den Extrastrom (die Selbstinduktion) hervorgebrachten Erscheinungen bei einem Elektron entsprechen also genau der Trägheit bei einer Masse. Wir müssen sagen, ein Elektron besitzt schon wegen seiner Ladung die Eigenschaften der Trägheit, auch wenn es gar nicht wirklich mit Masse versehen ist. Wir sagen deshalb, ein Elektron besitzt *scheinbare* Masse. Dieser Schein der Masse wird durch die Ladung hervorgebracht, durch die magnetischen Wirkungen einer bewegten Ladung in dem umgebenden Äther. Es läßt sich mathematisch zeigen, daß die scheinbare Masse einer Ladung um so größer ist, je kleiner das Volumen ist, welches die Ladung besitzt. Denken wir uns das Volumen nämlich kugelförmig, so sind die entstehenden magnetischen Kraftlinien um so näher an der Ladung, also um so wirksamer, je kleiner der Radius der Kugel ist. Die scheinbare Masse eines Elektrons ist, wie ausführliche Rechnung zeigt, gleich $^2/_3$mal dem Quadrat seiner (elektrostatisch gemessenen) Ladung, dividiert durch seinen Radius und dividiert durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit — vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeit des Elektrons nicht sehr nahe an die Lichtgeschwindigkeit herankommt.

Daraus können wir aber die Größe eines Elektrons, seinen Radius berechnen. Die Masse eines Elektrons ist der 1835. Teil der Masse eines Wasserstoffatoms, und da diese nach S. 10 gleich $1{,}64 \cdot 10^{-24}$ ist, so ist die Masse eines Elektrons

$$= \frac{1{,}64}{1835} \cdot 10^{-24} = 8{,}9 \cdot 10^{-28} \text{ Gramm.}$$

Die Ladung eines Elektrons ist nach S. 20 gleich $4{,}74 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten. Also ist der Radius eines Elektrons gleich

$$\frac{2}{3} \cdot \frac{22{,}5 \cdot 10^{-20}}{8{,}9 \cdot 10^{-28} \cdot 9 \cdot 10^{20}} = 1{,}9 \cdot 10^{-13} \text{ cm.}$$

Der Radius eines Elektrons hat die Größe $1{,}9 \cdot 10^{-13}$ cm. Wir erinnern uns von S. 9, daß der Radius eines Atoms von der Ordnung 10^{-8} cm ist. Veranschaulichen wir uns dieses Verhältnis an einem Beispiel. Der Radius der Erde

beträgt rund 6350 Kilometer. Denken wir uns ein Atom Wasserstoff vergrößert, so daß es den ganzen Raum der Erde einnimmt, so hat ein Elektron bloß den Radius 120 Meter, es entspricht also etwa dem Raum einer großen Kirche, aber nicht mehr. So wie diese winzig ist im Vergleich zur ganzen Erde, so ist ein Elektron winzig im Vergleich zu einem Atom.

Daß die Masse eines Elektrons *nur* scheinbare Masse ist, ist zunächst nach den obigen Betrachtungen bloß möglich. Es könnte immerhin sein, daß doch auch wirkliche Masse, Materie, mit dem Elektron verbunden wäre. Aber das ist nicht der Fall, wie weitere Versuche lehren. Es ergibt sich nämlich aus der Theorie, daß die scheinbare Masse eines Elektrons nur dann den oben angeführten, konstanten Wert hat, wenn die Geschwindigkeit des Elektrons klein ist gegen die Lichtgeschwindigkeit, also etwa wie bei den Kathodenstrahlen bloß $^1/_5$ bis $^1/_3$ der Lichtgeschwindigkeit ist. Wenn aber die Geschwindigkeit eines Elektrons sehr viel größer wird, nahe an die Lichtgeschwindigkeit herankommt, dann muß seine scheinbare Masse auch größer werden, und bei Erreichung der Lichtgeschwindigkeit würde sie sogar unendlich groß werden. Nun kennen wir, wie im nächsten Kapitel genauer auseinandergesetzt werden wird, in den β-Strahlen des Radiums negative Elektronen, deren Geschwindigkeit viel größer als die der Kathodenstrahlen ist, und in der Tat hat sich experimentell gezeigt, daß deren Masse immer größer wird, je mehr sich ihre Geschwindigkeit der des Lichtes nähert. Das konnte man daraus ermitteln, daß man auch bei ihnen die *spezifische Ladung* bestimmte, d. h. das Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse. Wächst die Masse, so muß die spezifische Ladung kleiner werden und immer kleiner, je mehr man sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Es ergaben z. B. die Versuche über die spezifische Ladung der Elektronen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit folgendes:

Geschwindigkeit		Spezifische Ladung	
$1{,}00 \cdot 10^{10}$	cm/sek	$1{,}77 \cdot 10^{8}$	Coulomb/Gramm
$1{,}50 \cdot 10^{10}$	„	$1{,}77 \cdot 10^{8}$	„
$2{,}36 \cdot 10^{10}$	„	$1{,}31 \cdot 10^{8}$	„
$2{,}48 \cdot 10^{10}$	„	$1{,}17 \cdot 10^{8}$	„
$2{,}59 \cdot 10^{10}$	„	$0{,}97 \cdot 10^{8}$	„
$2{,}72 \cdot 10^{10}$	„	$0{,}77 \cdot 10^{8}$	„
$2{,}83 \cdot 10^{10}$	„	$0{,}63 \cdot 10^{8}$	„

Also bei der Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit ($3 \cdot 10^{10}$ cm/sek) bis auf 94% derselben nahm die spezifische Ladung auf etwa den dritten Teil ab, die scheinbare Masse wuchs also auf etwa das Dreifache.

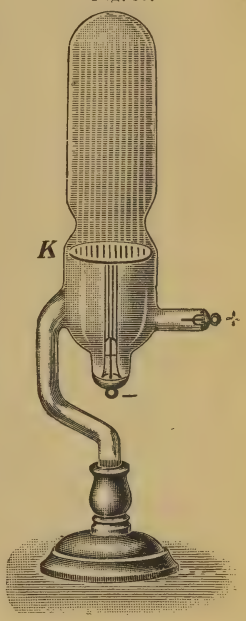
Daraus ist mit Sicherheit zu schließen, daß ein Elektron nur scheinbare Masse, keine wirkliche besitzt.

Für die negativen Elektronen ist so der Beweis ihrer Existenz geführt, und da wir bei der Elektrolyse aus einem Molekül ein positiv und ein negativ geladenes Ion erhalten, so ist also mindestens sicher, daß ein Molekül außer den materiellen Atomen noch wenigstens negative Elektronen besitzen muß.

Wie steht es nun aber mit der positiven Elektrizität, mit den positiven Elektronen? In den evakuierten Röhren treten beim Stromdurchgang unter bestimmten Umständen nicht bloß die negativen Kathodenstrahlen, sondern auch Strahlen mit positiver Ladung auf, die man als *Kanalstrahlen* bezeichnet.

Bringt man nämlich, wie in Fig. 10, im Innern der Röhre eine Kathode mit Löchern oder Spalten, also mit Kanälen; an und in dem unteren Teil der Röhre eine Anode, so gehen die Kathodenstrahlen von K nach unten, in den Raum, in dem sich die Anode befindet, und erregen unten das Glas zu grüner Fluoreszenz. Aber man sieht dabei weiter von den Kanälen aus nach oben andere Strahlen ausgehen, die in Luft rotbraun gefärbt sind, und dieses sind die Kanalstrahlen. Daß sie positive Ladungen mit sich führen, wurde daraus erkannt, daß sie von einem Magneten und von einem elektrostatischen Feld abgelenkt werden, aber gerade nach der entgegengesetzten Richtung wie die Kathodenstrahlen.

Fig. 10.

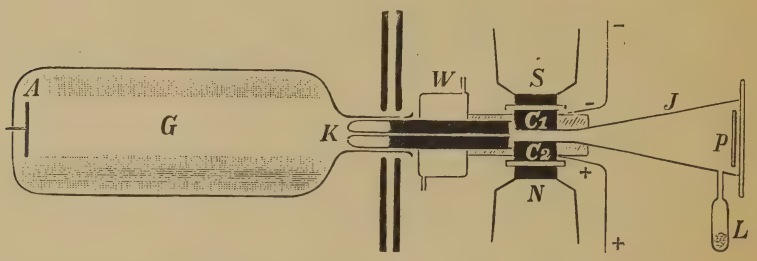


Durch Messung der Größe der magnetischen und elektrostatischen Ablenkung konnten nun aber auch hier, wie bei den Kathodenstrahlen, die beiden wichtigen Fragen beantwortet werden: Welches ist die Geschwindigkeit der Teilchen, die in den Kanalstrahlen fliegen, und zweitens, welches ist ihre spezifische Ladung? Die Geschwindigkeit ergab sich verschieden, aber immer viel kleiner als bei den Kathodenstrahlen. Während sie dort $^1/_5$ bis $^1/_3$ der Lichtgeschwindigkeit war, ist sie hier etwa $^1/_{500}$ bis $^1/_{1000}$ der Lichtgeschwindigkeit, also mehrere hundert Mal kleiner als bei den Kathodenstrahlen. Wichtiger war noch die Antwort auf die Frage über die Größe der spezifischen Ladung. *Diese ergab sich ausnahmslos kleiner oder höchstens gleich* $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$, während sie, wie oben ausgeführt, bei den Kathodenstrahlen 1835mal größer war. Daraus ist (nach S. 19) zunächst zu schließen, daß die positive Elektrizität in den Kanalstrahlen nicht frei für sich vorkommt, sondern stets nur in Verbindung mit gewöhnlichen Atomen, daß es also *Ionen* sind, welche die Kanalstrahlen bilden. Und weiter: während der Wert der spezifischen Ladung bei den Kathodenstrahlen sich immer als derselbe ergab, welches Gas auch in der Röhre vorhanden war, ist das bei den Kanalstrahlen ganz anders. Die Größe der spezifischen Ladung ist durchaus verschieden, je nachdem in der Röhre Luft oder Wasserstoff oder Helium oder Sauerstoff ist, auch ein Beweis dafür, daß die positive Elektrizität hier immer mit den Atomen verbunden ist.

Aber die genauere Untersuchung der Kanalstrahlen hat gezeigt, daß in jedem Fall, welches auch das Gas in der Röhre ist, es mehrere verschiedenartige Träger der positiven Elektrizität gibt. Man macht die Ablenkungsversuche an Kanalstrahlen in der Art, daß man einen solchen Strahl nicht etwa abwechselnd der magnetischen und der elektrostatischen Ablenkung unterwirft, sondern vielmehr die magnetische und die elektrische Kraft gleichzeitig auf ihn wirken läßt, jedoch so, daß die durch die beiden Kräfte hervorgerufenen Ablenkungen in zwei aufeinander senkrechten Richtungen erfolgen. Indem man den Kanalstrahl auf eine photographische Platte (innerhalb der Röhre)

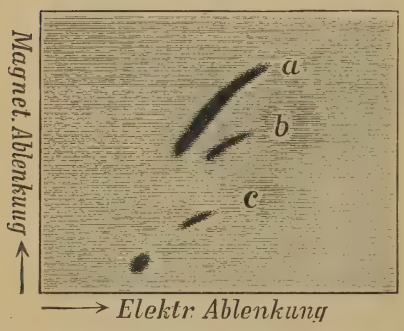
wirken läßt, erhält man ein schief gegen diese beiden Richtungen abgelenktes Bild, aus dessen Lage man durch Ausmessung sowohl die magnetische wie die elektrische Ablenkung bestimmen und damit sofort die spezifische Ladung wie die Geschwindigkeit der Kanalstrahlteilchen berechnen kann. Da die Geschwindigkeiten der verschiedenen Teilchen eines Kanalstrahls nicht die gleichen sind, erhält man bei einem dünnen kreisförmigen Kanalstrahlenbündel

Fig. 11.



nicht einen abgelenkten Kreis, sondern eine Kurve, und zwar eine Parabel. Einen Apparat von *J. J. Thomson* und *Aston* für diese Versuche zeigt Fig. 11. In ein Glasrohr G, das bei A eine eingeschmolzene Anode A enthält, ist bei K die Kathode eingekittet. Dieselbe besteht aus einem Metallzylinder, welche einen feinen Kanal enthält. Der vordere Teil von K besteht aus Aluminium mit abgerundeter Vorderfläche, der hintere Teil aus weichem Eisen. Der Kanal mündet in ein eingekittetes trichterförmiges Glasrohr J, welches bei P die photographische Platte enthält. Fließendes Wasser, welches durch den Behälter W strömt, schützt die Kittstelle der Röhre vor Erwärmung. Auf die Teilchen, welche durch den Kanal fliegen, wirkt ein Elektromagnet NS, an dessen Polschuhe isoliert zwei Kondensatorplatten C_1 und C_2 gesetzt sind, die mit dem positiven und negativen Pol einer Batterie verbunden sind. Durch die elektrische Kraft zwischen C_2 und C_1 wird der Kanalstrahl nach oben (zur negativen Platte hin), durch die magnetische Kraft zwischen N und S wird er nach vorn abgelenkt. Auf der Platte P entsteht also eine von der Mitte aus nach oben und vorn sich erstreckende Parabel, wenn der Kanalstrahl eine bestimmte spezifische Ladung enthält, d. h. wenn die positive Ladung mit einem bestimmten Atom oder Molekül verbunden ist. Wenn aber in dem Kanalstrahl mehrere verschiedene Massen mit positiver Ladung versehen sind, wie es tatsächlich der Fall ist, so erhält man auf der photographischen Platte mehrere getrennte Parabeln. So zeigt Fig. 12 eine Aufnahme in Wasserstoff, bei der drei verschiedene Parabeln aufgetreten sind, Fig. 13 eine Aufnahme in einem Gasgemisch, mit sehr vielen Parabeln.

Fig. 12.



Welches auch das Gas in der Röhre ist, immer findet man verschiedene Träger der positiven Elektrizität. In Wasserstoff findet man z. B., daß es positiv geladene Atome, also H^+, aber auch positiv geladene Moleküle H_2^+ gibt. Die Parabel a in Fig. 12 rührt von H^+-Atomen, die Parabel b von H_2^+-Ionen her. Ja, es scheint auch dreifache Verbindungen von Wasserstoff zu geben, die positiv geladen sind, also Ionen von der Art H_3^+. Weiter aber hat sich gezeigt, daß es unter den Kanalstrahlen auch negativ geladene Strahlen gibt, die erst entstehen, wenn die Kanalstrahlen schon gebildet sind. So haben sich z. B. negativ geladene Wasserstoffatome H^- gezeigt. Ebenso hat man positiv und negativ geladene Sauerstoffatome O^+ und O^- gefunden, ferner Kohlenstoffatome, die einfach positiv oder negativ geladen waren, C^+ und C^- (Parabel c in Fig. 12 rührt von C^+-Atomen her), und solche, die doppelt positiv geladen waren, C^{++}, ferner auch positiv oder negativ geladene Moleküle von Kohlenstoff C_2^- und C_2. Mittels dieser Kanalstrahlenaufnahmen erhält man also eine Einsicht in die verschiedenen Kombinationen, die die Atome der Elektrizität mit den Atomen und Molekülen der materiellen Körper eingehen. Die Kanalstrahlenaufnahmen dienen also zur chemischen Analyse von Gasen, man bezeichnet sie deswegen auch als *Kanalstrahlenanalyse.*

Fig. 13.

Was aus diesen Untersuchungen folgt, ist ein doppeltes. Erstens: freie positive Elektronen sind nicht gefunden worden, und zwar, wie wir hinzusetzen wollen, niemals, auch bei anderen Versuchsanordnungen nicht. Wir können es als das Resultat aller bisherigen Versuche hinstellen: Während die negative Elektrizität frei für sich vorkommen kann, ohne Verbindung mit Materie, ist das bei der positiven Elektrizität nicht der Fall. *Die positive Elektrizität ist stets und durchgängig an die Atome der gewöhnlichen Materie gebunden.*

Und zweitens ersehen wir, daß die Verbindungen von Atomen untereinander zu Molekülen und mit der Elektrizität zu Ionen vielseitiger sind, als wir zunächst glaubten. Es gibt positiv und negativ geladene Atome derselben Art, es gibt auch solche Atome mit mehrfachen positiven oder negativen Ladungen, aber es gibt auch außer den neutralen Molekülen positiv bzw. negativ geladene Moleküle mit einer oder mehreren Ladungen.

Eine umfassende Atomtheorie wird diesen vielfachen Möglichkeiten, wie sich die Atome in Wirklichkeit verhalten, Rechnung zu tragen haben.

DRITTER VORTRAG

DER ZERFALL DER ATOME BEI DEN RADIOAKTIVEN STOFFEN / DIE KERNTHEORIE DER ATOME

*Das Uran, Radium, Thorium und Aktinium als radioaktive Substanzen * Die α-β-γ-Strahlen * Die α-Teilchen sind doppelt geladene Heliumionen * Emanation * Atomzerfall * Die Heliumionen sind Bestandteile der Atome der radioaktiven Stoffe * Wilsonsche Photographien der α-Strahlen * Zerstreuung der α-Teilchen * Rutherfordsche Atomtheorie * Die positive Ladung des Kerns ist gleich der Ordnungszahl des Atoms * Die Masse ist scheinbar * Größe des Kerns * Isotope Elemente*

SEITDEM am Beginn dieses Jahrhunderts erst durch *Becquerel*, dann durch *P. Curie* und Frau *Curie* entdeckt wurde, daß einige chemische Elemente radioaktive Eigenschaften besitzen, d. h. daß sie dauernd Strahlen besonderer Art aussenden, hat die Forschung eine große Reihe von wichtigen Eigenschaften dieser Strahlen und der Elemente, von denen diese ausgehen, gefunden, Eigenschaften, welche für die Atomtheorie von besonderer Wichtigkeit geworden sind.

Als erste radioaktive Substanz hat *Becquerel* das *Uran* erkannt, welches im metallischen Zustand, aber auch in allen seinen Verbindungen die Eigenschaft besitzt, photographische Platten, auch wenn sie durch schwarzes Papier umhüllt sind, zu schwärzen, ferner manche Körper zur Fluoreszenz zu erregen und endlich die Luft und andere Gase leitend zu machen, zu ionisieren, so daß elektrisch geladene Körper, wenn Uran in ihre Nähe gebracht wird, ihre Ladung nicht behalten, sondern sie durch die leitend gewordene Luft zur Erde abfließen lassen. Diese Wirkungen werden durch Strahlen hervorgebracht, die von dem Uran ausgehen, das Uran ist; wie man es nennt, ein *radioaktiver* Stoff. Da, wie gesagt, alle chemischen Verbindungen, die Uran enthalten, ebenso wie das metallische Uran selbst diese Eigenschaften zeigen, so muß die Radioaktivität eine Eigenschaft der Atome des Urans, eine *atomistische Eigenschaft* sein.

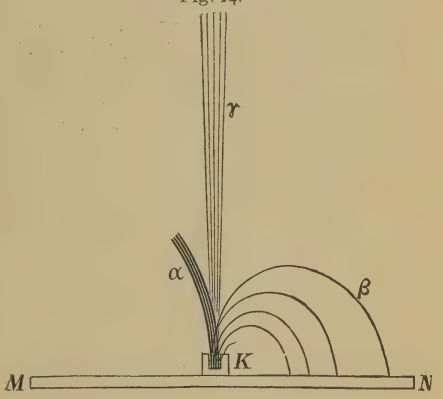
Viel stärkere Wirkungen, aber von genau derselben Art, zeigt das *Radium*, ein Stoff, der bekanntlich von Frau *Curie* aus der Joachimsthaler Pechblende — die Uran enthält — durch mühsame Arbeit in kleinen Quantitäten abgeschieden wurde. Auch das Radium zeigt die Radioaktivität sowohl im metallischen Zustand, wie auch in allen seinen chemischen Verbindungen, als welche im wesentlichen Chlorradium, Bromradium und salpetersaures Radium praktisch hergestellt und gebraucht werden. Auch hier sind es also die Atome, welche radioaktiv sind. Das Atomgewicht des Radiums wurde von Frau *Curie* zu 226 ermittelt. Es ist also eines der schwersten Atome. Aber das Atom des Urans ist noch schwerer, sein Atomgewicht ist 238,2.

Auch ein dritter Körper mit sehr großem Atomgewicht, das *Thorium*, Atomgewicht 232,15, erwies sich als radioaktiv, und endlich wurde aus der Pechblende noch ein weiterer Stoff, das *Aktinium*, in kleinen Quantitäten abgeschieden, das ebenfalls radioaktiv ist, dessen Atomgewicht aber noch nicht bestimmt werden konnte. Es ist jedenfalls auch sehr hoch, man schätzt es auf 227.

Die Elemente also mit den höchsten Atomgewichten zeigen die radioaktive Strahlenausgabe. Eine genauere Untersuchung der Strahlung aller dieser

Substanzen hat nun aber gezeigt, daß sie eine gemischte ist, daß in ihnen *drei Strahlensorten* verschiedener Art enthalten sind. Man kann diese Strahlensorten trennen durch Anwendung eines Magneten. Wenn man nämlich, wie in Fig. 14, in K ein Quantum Radiumsalz hat, von dem die Strahlung ausgeht, und wenn man einen kräftigen Magneten mit seinem Nordpol vor diesen Behälter bringt, so werden gewisse dieser Strahlen von ihrer geraden Richtung abgelenkt, andere nicht. Unter den ablenkbaren Strahlen aber wird ein Teil stark nach rechts abgelenkt. Diese Strahlen bezeichnet man als *Beta-Strahlen* (β-Strahlen), ein anderer Teil der Strahlen wird schwach nach links abgelenkt, man bezeichnet sie als *Alpha-Strahlen* (α-Strahlen), und der dritte Teil der Strahlen bleibt unabgelenkt, man bezeichnet diese als *Gamma-Strahlen* (γ-Strahlen). Von den unabgelenkten Strahlen, die sich ebenso wie die Röntgenstrahlen verhalten, wollen wir erst im folgenden Kapitel sprechen, es sei hier nur erwähnt, daß dies diejenigen Strahlen sind, die für gewöhnlich die wirksamsten sind. Denn sie allein gehen durch dickere Schichten von festen, flüssigen und gasförmigen Substanzen hindurch und, wenn die radioaktive Substanz, wie es normal der Fall ist, in ein Gefäß eingeschlossen ist, so sind sie es allein, die durch die Wände des Gefäßes hindurchdringen und außen ihre Wirksamkeit zeigen. Die medizinische Anwendung des Radiums beruht fast ausschließlich auf den γ-Strahlen.

Fig. 14.



Die α- und die β-Strahlen werden von einem Magneten abgelenkt und sie müssen daher, nach unseren früheren Ausführungen, aus elektrisch geladenen Teilchen bestehen. Aus der Richtung der Ablenkung erkennt man, daß die α-Strahlen positiv geladene Teilchen, die β-Strahlen negativ geladene Teilchen enthalten. Die wichtigste Frage ist auch hier, ganz ebenso wie bei den Kathodenstrahlen und den Kanalstrahlen, welcher Art sind diese Teilchen? Diese Frage aber und zugleich die Frage, welches die Geschwindigkeit dieser Teilchen ist, ließ sich hier, genau ebenso wie bei den Kathodenstrahlen und den Kanalstrahlen, beantworten, indem man einerseits die magnetische Ablenkung und anderseits die elektrostatische Ablenkung der Strahlen quantitativ messend verfolgte. Denn aus diesen beiden Messungen konnte man sowohl die Geschwindigkeit, wie die *spezifische Ladung* der Teilchen bestimmen (siehe oben S. 25).

Für die β-Strahlen ergaben diese Messungen, daß ihre spezifische Ladung ungefähr $1{,}7 \cdot 10^8 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ ist, also *ebenso groß ist wie bei den Kathodenstrahlen.* Genau wie bei diesen müssen wir also schließen, daß es die *negativen Elektronen* selbst sind, welche die β-Strahlen bilden. Die Geschwindigkeit aber der radioaktiven β-Strahlen erwies sich für die verschiedenen radioaktiven

Substanzen verschieden groß und zum Teil außerordentlich viel größer als die der Kathodenstrahlen. In manchen Fällen nähert sich die Geschwindigkeit bis auf wenige Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Daß in diesem Falle die spezifische Ladung kleiner wird und daß dies ein Beweis dafür ist, daß die Masse der negativen Elektronen bloß *scheinbare Masse* ist, haben wir auf S. 28 schon besprochen.

Von besonderem Interesse aber war hier die Frage nach der Natur der α-Strahlen mit ihren positiven Ladungen. Von der gesamten Strahlungsenergie eines radioaktiven Stoffes führen die α-Strahlen fast 90% mit sich. Die größte Energieabgabe geschieht also durch sie. Anderseits aber werden die α-Strahlen schon durch ganz dünne Schichten fremder Substanz absorbiert. Schon durch dünnes Papier, schon durch eine Aluminiumschicht von 0,02 mm Dicke gehen sie nicht mehr hindurch. In Luft erreichen sie Wege von einigen Zentimetern, 3—7 cm, je nach ihrer Geschwindigkeit, und hören dann *plötzlich* auf. Diese Strecke bezeichnet man als die *Reichweite* der α-Strahlen. Es ist eine höchst auffallende und zunächst gar nicht zu erklärende Tatsache, daß diese α-Strahlen nach Durchlaufung eines Weges von einigen Zentimetern *plötzlich* aufhören. Bis zu dieser Stelle ihrer Bahn zeigen sie die Fähigkeit, Gase zu ionisieren und auf photographische Platten zu wirken, noch vollkommen ungeschwächt und dann hören sie plötzlich auf. Es ist keine allmähliche Schwächung durch Absorption der Grund ihres Aufhörens, sondern es findet eben ein plötzliches Verschwinden statt.

Um die Natur der α-Teilchen zu ergründen, mußte also auch ihre spezifische Ladung ermittelt werden. Durch dieselben Messungen, die diese zu bestimmen erlaubten, erhielt man auch wieder ihre Geschwindigkeit, die sich 50- bis 100mal so groß ergab wie die der Kanalstrahlen. Die direkte Messung nun für die spezifische Ladung ergab den Wert 48 200 $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$, also von derselben Größenordnung, wie sie die Ionen bei der Elektrolyse haben. *Sicher also sind die positiven Ladungen hier mit gewöhnlicher Materie verbunden, ebenso wie bei der Elektrolyse.* Da die spezifische Ladung eines Atoms bei der Elektrolyse gleich 96 494, dividiert durch das Äquivalentgewicht, ist, so würde folgen, daß die unbekannte Materie das Äquivalentgewicht 2 (rund) hätte. Wir kennen aber kein Atom mit dem Äquivalentgewicht 2. Aber es wird auch bei diesem Schluß vorausgesetzt, daß das Atom dabei bloß ein einziges Elementarquantum (siehe S. 20) trägt, eine Voraussetzung, die erst geprüft werden muß und die sich tatsächlich als unrichtig erwiesen hat. Der ausgezeichnete englische Physiker *Rutherford*, der zur Kenntnis und Erklärung der radioaktiven Erscheinungen das meiste beigetragen hat, hat durch eine elegante Methode bewiesen, daß jedes α-Teilchen 2 positive Elementarquanten trägt. Danach muß das Äquivalentgewicht des betreffenden Teilchens gleich 4 sein. Und nun kennen wir einen Stoff, das *Helium*, dessen Äquivalentgewicht (gleich seinem Atomgewicht) gleich 4 ist. Daraus ergab sich der wichtige Schluß, *daß die α-Teilchen nichts anderes sind als Heliumatome mit zwei positiven Elementarladungen.* Dieser Schluß, daß die radioaktiven Substanzen außer negativen Elektronen noch doppelt positiv geladene Heliumatome aussenden, wird durch

eine Reihe von Experimenten bestätigt. In abgeschlossenen Räumen, in denen vorher keine Spur von Helium, sondern nur Radium vorhanden war, zeigt sich nach einiger Zeit die Anwesenheit des Heliums deutlich durch sein ganz charakteristisches Spektrum an. Das Helium hat sich aus dem Radium entwickelt.

Schon bald nach der Entdeckung des Radiums wurde von Frau *Curie* gefunden, daß alle Körper, die in der Nähe des Radiums sich befinden, selbst radioaktiv werden, wenn auch nur vorübergehend. Ein Stück Papier, ein Stück Glas, ein Stück Holz oder Metall, das sich in der Nähe von Radium befindet, sendet selbst Strahlen aus, die die Luft leitend machen. Aber diese Eigenschaft behalten die Körper nur eine verhältnismäßig kurze Zeit, dann werden sie wieder inaktiv. Man bezeichnet ihre Aktivität als *mitgeteilte Aktivität.* Das Geheimnis derselben wurde durch eine Entdeckung aufgehellt, die *Rutherford* zuerst bei dem Thorium machte, die sich aber dann auch beim Radium ergab. Es geht nämlich, wie er fand, von diesen Körpern eine *gasförmige Substanz* aus, die er *Emanation* nannte, und die selbst radioaktiv ist, die selbst Körper zum Fluoreszieren bringt und die Luft ionisiert. Diese Emanation aber behält auch ihre Aktivität nicht unverändert bei, sondern sie verliert sie allmählich, und zwar fällt die Radiumemanation in je 3,85 Tagen auf die Hälfte ihrer vorherigen Wirksamkeit ab, wie man durch Messung ihres Ionisierungsvermögens feststellte. Die Thoriumemanation sinkt dagegen schon in 54 Sekunden, die Emanation des Aktiniums schon in 3,9 Sekunden auf den halben Betrag. Diese Zeiten, die man die *Abklingungskonstanten* oder *Halbwertzeiten* nennt, sind ganz charakteristisch und ergeben sich bei der Emanation radioaktiver Körper immer und unter allen Umständen als die gleichen. Sie sind unabhängig davon, ob man die Messung gleich nach Entwicklung der Emanation vornimmt oder später, ob man viel Substanz oder wenig anwendet. Die Emanation ist also danach auch ein radioaktiver Stoff, aber nicht einer wie die zuerst genannten, Radium, Thorium usw., die ihre Aktivität dauernd beibehalten, sondern einer, der seine Aktivität allmählich verliert, *ein Stoff mit vorübergehender Aktivität.* Ebenso zeigt auch die *mitgeteilte Aktivität* eine Abklingung. Aber anders wie bei den Emanationen ergibt sich bei dieser der Wert der Abklingungskonstante ganz verschieden, je nachdem die mitgeteilte Aktivität schon kürzere oder längere Zeit bestanden hat.

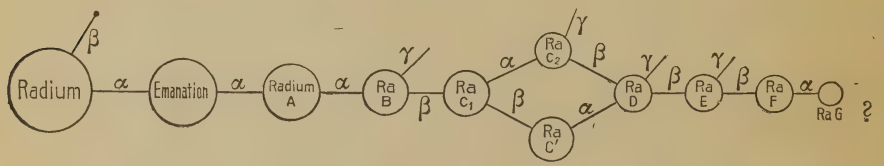
Diese auffallende Tatsache, daß es vorübergehend radioaktive Körper gibt, führte zu der Theorie, die zuerst von *Rutherford* aufgestellt wurde, daß die *Atome* der radioaktiven Körper nicht unveränderlich sind, sondern zerfallen, zu der *Theorie des Atomzerfalls.* In den radioaktiven Stoffen treten danach wirklich, und zwar ohne unser Zutun, die Kräfte auf, welche den inneren Zusammenhang eines Atoms lockern und das Atom in Teile zersprengen. *Die Unveränderlichkeit und Unteilbarkeit der Atome ist bei ihnen tatsächlich widerlegt.*

Aus einem Atom des Radiums entwickelt sich durch Abgabe eines α-Teilchens ein Atom eines neuen Stoffes, eben der *Emanation.* Dieses Atom aber zerfällt auch wieder durch Abgabe eines α-Teilchens und bildet nun ein Atom desjenigen Stoffes, den man im großen und ganzen *mitgeteilte Aktivität* nennt. Die Unbestimmtheit von deren Aklingungskonstante kommt daher, daß diese nicht ein einfacher Stoff ist, sondern daß aus ihr der Reihe nach sich verschiedene Stoffe bilden, die also zum Teil nebeneinander bestehen, und zwar

in verschiedenen relativen Mengen, je nach der Zeit, die seit ihrer ersten Entstehung verstrichen ist. Diese aus der Emanation der Reihe nach sich bildenden Stoffe bezeichnet man als Radium A, Radium B usw. bis Radium F. Ein Atom eines dieser Körper bildet sich aus dem Vorhergehenden durch Ausstoßung von α- oder von β-Teilchen oder von beiden, wobei zum Teil auch γ-Strahlen (Röntgenstrahlen) entstehen.

Die allmähliche Bildung dieser einzelnen Stoffe ist nach neueren Forschungen für das Radium durch Fig. 15 dargestellt, wobei auch die Art der Strahlen angegeben ist, durch die aus einem vorhergehenden Atom sich das folgende bildet. Die Stoffe: Radium A, B, C_1, haben sehr kleine Halbwertzeiten, solche von 3; 26,8; 19,6 Minuten, sie sind also rasch verschwindende Substanzen, von denen schon nach einigen Stunden nichts mehr zu erkennen ist. Von dem Radium C_1 aber gehen bei einzelnen Atomen zunächst α-Teilchen aus und bilden das Radium C_2, das durch Aussendung eines β-Teilchens zu Radium D wird, bei anderen Atomen des Radiums C_1 wird zuerst ein β-Teilchen ausgestoßen, wodurch sich Radium C′ bildet, das dann durch Verlust eines α-Teilchens auch zu Radium D wird. Beim Radium C_1 tritt, wie man sagt, eine

Fig. 15.



Verzweigung ein. Das Radium D besitzt nun umgekehrt eine sehr große Halbwertzeit, eine solche von 16,5 Jahren, ist also ein sehr beständiger Körper, der sich nur allmählich unter Ausgabe sehr schwer beobachtbarer β-Strahlen zu Radium E und F umbildet. Diese sind auch ziemlich langlebig, da sie Halbwertzeiten von 5 bzw. 136 Tagen besitzen. Das Radium F ist durchaus identisch mit dem *Polonium*, welches Frau *Curie* gleichzeitig mit dem Radium aus der Pechblende abgeschieden hat, das aber, wie man jetzt sieht, nur ein Abkömmling des Radiums ist. Von Radium F gehen α-Strahlen aus, und es entsteht ein Stoff Radium G, über dessen Natur wir später sprechen werden.

In ähnlicher Weise hat sich die Entwicklung der Atome aus dem Thorium feststellen lassen, die durch folgende Reihe mit den Abklingungszeiten und den ausgesendeten Strahlen dargestellt ist (siehe nebenstehend).

Auch hier findet beim Thorium C eine Verzweigung statt.

Die Aktiniumreihe ist von minderer Bedeutung. Dagegen ist es von hohem Interesse, daß das Radium direkt ein Abkömmling des *Urans* ist. Man hat nämlich gefunden, daß das Uran durch einen Zwischenkörper *Ionium*, der eine außerordentlich große Halbwertzeit (von etwa 1 Million Jahre) besitzt, in das Radium übergeht, das selbst eine Halbwertzeit hat, die ungefähr 2000 Jahre beträgt.

Alle diese Substanzen, das Uran, das Radium, das Thorium, das Aktinium mit ihren Produkten senden α- und β-Strahlen aus. Und bei allen sind sowohl die β-Strahlen dieselben, wie die α-Strahlen. Alle β-Strahlen bei den

Substanz	Abklingungszeit
Thorium	—
↓ α	
Mesothorium I	6,7 Jahre
↓ β	
Mesothorium II	6,2 Stunden
↓ β,γ	
Radiothorium	1,905 Jahre
↓ α	
Thorium X	3,7 Tage
↓ α,β	
Thoriumemanation	54,53 Sekunden
↓ α	
Thorium A	0,14 Sekunden
↓ α	
Thorium B	10,6 Stunden
↓ β	
Thorium C	55 Minuten
↓ α,β	
Thorium D	3,1 Minuten
↓ β,γ	

verschiedensten Substanzen sind negative Elektronen, die sich nur dadurch voneinander unterscheiden, daß ihre Geschwindigkeiten verschieden sind. Und alle α-Strahlen, *bei allen Substanzen*, sind doppelt positiv geladene Heliumatome, die sich nur dadurch unterscheiden, daß sie verschiedene Geschwindigkeit besitzen und verschieden lange Strecken in der Luft zurücklegen, bis sie aufhören zu ionisieren, die sich also nur durch ihre *Reichweite* unterscheiden.

Daraus aber folgt mit Notwendigkeit, daß die *Atome dieser Stoffe, also des Urans, Radiums, Thoriums und Aktiniums* und ihrer Folgesubstanzen *Heliumatome und negative Elektronen als Bestandteile besitzen müssen.* Bei diesen schwersten Atomen sind also die engeren Bestandteile des Atoms durch diese Untersuchungen bekannt.

Es geht aus dem Gesagten nicht notwendig hervor, daß z. B. ein Radiumatom *nur* aus Heliumatomen und negativen Elektronen bestehen muß. Es könnte auch noch andere Stoffe als Bestandteile haben, z. B. Wasserstoffatome. Aber weder im positiven noch im negativen Sinn liegt hierfür ein Beweis bisher vor.

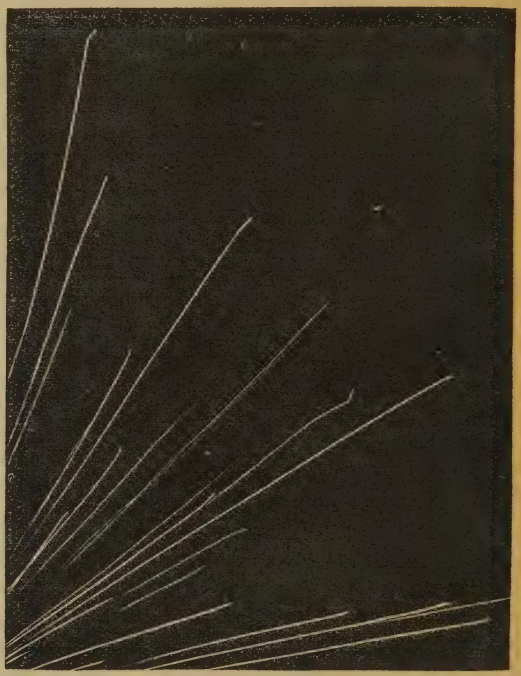
Die Abschleuderung der α-Teilchen aus einem Stück Radium oder aus einem Stück der anderen radioaktiven Stoffe läßt sich durch eine höchst interessante Versuchsanordnung *sichtbar* machen. Die verschiedenen Strahlenarten nämlich, sowohl die α-, wie die β- (und auch die γ-) Strahlen machen die Luft, durch die sie hindurchgehen, elektrisch leitend, sie *ionisieren*, wie man sagt, die Luft. Werden nämlich Luftteilchen oder Teilchen eines anderen Gases von solchen Strahlen getroffen, so findet eine Zertrümmerung der Gasteilchen statt, es bilden sich aus einem Gasmolekül positive und negative Ionen, Gas-Ionen. Von welcher Art diese Ionen sind, interessiert uns hier nicht näher. Dieses Leitendwerden der Gase, das man messend verfolgen kann, gibt schon seit langer Zeit die Hauptmethode zur Untersuchung der radioaktiven Erscheinungen.

Diese Gas-Ionen nun haben eine besondere Eigenschaft: sie können nämlich als sogenannte *Nebelkerne* wirken. Wenn man nämlich in ein geschlossenes

Gefäß, das Luft enthält, auf den Boden etwas Wasser bringt, so entwickeln sich Wasserdämpfe, die sich der Luft beimengen, und die ebenso unsichtbar sind wie die Luft. Je nach der Temperatur, die das Gefäß besitzt, ist mehr oder weniger Wasser in Form von Wasserdampf vorhanden. Der Wasserdampf ist, wie man es nennt, *gesättigt*, es ist gerade soviel Wasserdampf vorhanden, als der Temperatur und dem Volumen des Gefäßes entspricht. Wenn nun aber die Temperatur des Gefäßes plötzlich verringert wird, so gehört zu dieser niedrigeren Temperatur eine geringere Menge gesättigten Wasserdampfs und folglich muß sich der überschüssige Teil des Wasserdampfes in Form von

Fig. 16.

Fig. 17.

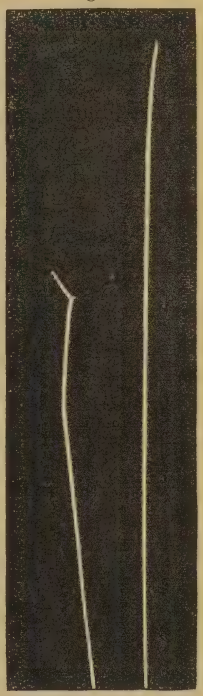


Nebel als Wassertröpfchen niederschlagen. Das sollte nun schon bei einer sehr kleinen Temperaturerniedrigung stattfinden. Aber in Wirklichkeit ist das (wegen der Oberflächenspannung) nicht der Fall, es gehört vielmehr eine ziemlich bedeutende Temperaturerniedrigung dazu, um in reiner Luft aus dem Wasserdampf Nebel entstehen zu lassen. Bedeutend erleichtert wird aber die Nebelbildung, wie man schon lange gefunden hat, wenn in der Luft Staub vorhanden ist (was gewöhnlich der Fall ist, wenn man die Luft nicht absichtlich filtriert hat). Die Staubteilchen wirken als *Nebelkerne* und an ihnen bilden sich leicht, auch schon bei geringer Temperaturerniedrigung, die Wassertröpfchen. Ebenso wie Staub wirken aber, wie man gefunden hat, auch die Gas-Ionen. Auch an einem Gas-Ion schlägt sich, schon bei geringer Temperaturerniedrigung, der Wasserdampf als flüssiges Wasser nieder. Um in

Luft rasch eine geringe Temperaturerniedrigung hervorzubringen, setzt man bei derartigen Experimenten das Gefäß, in dem die Luft enthalten ist, plötzlich durch Öffnen eines Hahnes mit einem anderen Gefäß von geringerem Druck der Luft in Verbindung. Dann findet beim plötzlichen Ausströmen, bei der plötzlichen Volumenvergrößerung eine Abkühlung der Luft statt, und es bildet sich bei Anwesenheit von Staubkernen oder Gas-Ionen sofort Nebel.

Diese Eigenschaft der Gas-Ionen benutzte der englische Physiker *Wilson* in einer sehr schönen Versuchsanordnung, um die Bahnen, welche die α-Teilchen oder die β-Teilchen durchlaufen, direkt sichtbar und sogar photographierbar zu machen. Hier interessieren uns nur die Bahnen der α-Teilchen. Er ließ in den Raum, der den Wasserdampf enthielt und den er die *Wolkenkammer* nannte, durch ein Stück eingebrachtes Radium die α-Teilchen eintreten. Diese ionisierten die Luft der Wolkenkammer und bildeten auf ihrem Wege eine große Anzahl von Gas-Ionen. Durch plötzliche Abkühlung des Gases in der beschriebenen Weise schlägt sich an diesen Ionen der Wasserdampf nieder und man sieht also einen Nebelstreifen in der Wolkenkammer, der direkt die Bahn der α-Teilchen bezeichnet. Durch plötzliche, im richtigen Moment eintretende Beleuchtung des Nebelstreifens kann man diesen sogar photographieren. Fig. 16 und 17 geben einige solche von *Wilson* aufgenommene Photographien der α-Strahlen, die von einem Stück Radium ausgehen. Sie entsprechen durchaus dem Bilde, das man sich schon vorher aus den Experimenten über die α-Strahlen gemacht hatte. Insbesondere zeigen sie, daß jeder Strahl nur eine bestimmte *Reichweite* besitzt, und daß er dann *plötzlich* aufhört. Bei näherer Betrachtung aber zeigen einige dieser α-Strahlen eine besondere Eigentümlichkeit, die für unsere weiteren Ausführungen von hervorragender Wichtigkeit ist. Man sieht nämlich in Fig. 17, daß einige dieser Strahlen kurz vor ihrem Ende eine scharfe, plötzliche *Umbiegung* zeigen, daß der geradlinige Strahl an einer Stelle einen kleinen Ansatz unter einem stumpfen Winkel enthält. Nicht alle Strahlen zeigen das, sondern nur einige. In Fig. 18 sind zwei Strahlen aus Fig. 17 vergrößert dargestellt, von denen der eine die Umbiegung zeigt, der andere nicht. Die α-Teilchen stoßen bei ihrem Flug die Luftteilchen und ionisieren sie, aber dabei bleiben sie im allgemeinen auf ihrer geradlinigen Bahn. Ihre Energie ist so groß, daß sie beim Stoß an die Luftteilchen nicht von ihrer Bahn abgelenkt werden. Aber hier und da, plötzlich, erfahren einige eine starke Abbiegung und hören dann kurz darauf auf, zu existieren. Was mag die Ursache dieser merkwürdigen Erscheinung sein?

Fig. 18.



Eine andere Beobachtung, die an den α-Teilchen gemacht wurde, hängt mit der eben angeführten zusammen. Wenn ein α-Teilchen, also ein Heliumatom

mit doppelter positiver Ladung, durch eine dünne Metallfolie hindurchgeht, so erleidet es durch diese im allgemeinen eine kleine Ablenkung von seiner Bahn, und ein dünnes Bündel von α-Strahlen zeigt deswegen beim Durchgang durch eine dünne Metallfolie eine kleine Erweiterung, eine *Zerstreuung*. Der Grund dafür ist leicht einzusehen. Da ja die Atome der Metallfolie selbst positive und negative Ladungen enthalten, so wird das positiv geladene Heliumatom von diesen bald in dem einen Sinne, bald in dem anderen Sinne etwas abgelenkt, aber im ganzen immer nur wenig. Man hat aus den Beobachtungen der Zerstreuung berechnen können, daß die α-Teilchen durch ein Goldatom im Durchschnitt nur eine Ablenkung von $\frac{1}{200}$ Grad erfahren.

Natürlich ist diese Ablenkung je nach den Umständen, wie ein α-Teilchen ein Atom trifft, bald etwas größer, bald etwas kleiner nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit, aber im Durchschnitt hat eben die Ablenkung nur die angegebene kleine Größe. Dagegen zeigte es sich nun bei diesen Beobachtungen, daß manchmal, hier und da, außerordentlich große Ablenkungen stattfanden, solche von 90^0 und darüber, Ablenkungen, die nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit nie hätten beobachtet werden können, da sie nur in Millionen oder Billionen Fällen einmal hätten sich ergeben können, während sie in Wirklichkeit schon in etwa 8000 Fällen je einmal vorkamen. Diese großen Ablenkungen machen den Eindruck, als ob das α-Teilchen hier und da einmal direkt von einem Atom der Metallfolie *reflektiert* worden wäre. Nicht bloß in Metallfolien, sondern auch in Gasen zeigte sich eine solche Zerstreuung der α-Teilchen und in gewissen Fällen eben eine solche von ganz unwahrscheinlicher Größe. Man sieht, daß das genau dieselbe Erscheinung ist, wie diejenige, die bei den *Wilson*schen Photographien, Fig. 17 und 18, sich zeigt. Auch hier scheint ein α-Teilchen hier und da einmal von einem Atom direkt *reflektiert* zu werden, und zeigt dadurch die geknickte Bahn.

Beim Nachdenken über die Ursache dieser merkwürdigen Erscheinung kam *Rutherford* zu dem Schluß, daß diese nur in der *Konstitution der Atome* der zerstreuenden Schicht gefunden werden könne. Die Größe dieser starken Ablenkungen hängt nämlich direkt mit dem Atomgewicht der zerstreuenden Substanz zusammen. Je größer das Atomgewicht der zerstreuenden Substanz (im Quadrat) ist, um so stärker sind diese außergewöhnlichen Ablenkungen. Danach können die Ablenkungen, sowohl die gewöhnlichen kleinen, wie die seltenen großen, nur dadurch zustande kommen, daß ein α-Teilchen *durch ein Atom hindurchfliegt*. Dann aber müssen in jedem Atom freie Lücken vorhanden sein, und die erste Folgerung daraus ist, *daß der Raum, den ein Atom einnimmt, nicht vollständig mit Masse ausgefüllt sein kann.*

Die merkwürdigen Erscheinungen bei den α-Teilchen, nämlich ihr plötzliches Aufhören nach Durchfliegung der Reichweite, ihre gewöhnliche schwache Zerstreuung und ihre außergewöhnlich starke Ablenkung erklären sich nun, wie *Rutherford* zeigte, wenn man annimmt, daß jedes Atom aus einem *positiv geladenen Kern* von äußerst kleinem Volumen besteht, und daß um diesen Kern herum in einem Abstand, der ungefähr der Größe des Atomradius entspricht, negative Elektronen vorhanden sind, so daß das ganze Atom neutral

ist. Diese negativen Elektronen liegen um den Kern herum oder kreisen um ihn wie die Planeten um die Sonne. Im allgemeinen nämlich wird dann ein α-Teilchen, dessen Dimensionen auch als sehr klein anzunehmen sind, irgendwo in dem Zwischenraum zwischen dem positiven Kern und den Elektronen durch das Atom durchfliegen und wird nur eine kleine Ablenkung erfahren, die aus der abstoßenden Wirkung des Kerns und der anziehenden Wirkung der Elektronen sich zusammensetzt, die aber deswegen klein bleibt, weil das α-Teilchen bei seinem Flug im allgemeinen verhältnismäßig weit von dem Kern und von den Elektronen sich durch das Atom bewegt. Dagegen kann es vorkommen, daß das α-Teilchen direkt auf ein negatives Elektron oder in selteneren Fällen auf den positiven Kern zufliegt. Im ersteren Fall wird es sich mit dem negativen Elektron vereinigen und aus einem doppelt positiv geladenen Heliumatom zu einem einfach geladenen werden, und wenn es dann noch einmal ein Elektron trifft, so wird es ein neutrales Heliumatom werden. Das wird, je nach der Geschwindigkeit des α-Teilchens, bald früher, bald später eintreten. Wenn aber diese Neutralisierung seiner Ladung einmal erreicht ist, dann verliert das Heliumatom, da es nun unelektrisch geworden ist, plötzlich seine Eigenschaft, zu ionisieren, und auf diese Weise erklärt sich das *plötzliche* Aufhören der α-Strahlen nach Durchfliegung der Reichweite.

In sehr viel selteneren Fällen — wegen der angenommenen Kleinheit des Kerns — wird es vorkommen, daß ein α-Teilchen in unmittelbare Nähe des Kerns des Atoms fliegt. In diesem Fall aber wird wegen der positiven Ladungen des α-Teilchens und des Kerns eine stark abstoßende Kraft auftreten, und das α-Teilchen wird unter einem scharfen Winkel aus seiner Bahn abgelenkt werden müssen. Auf diese Weise erklären sich also die beiden so auffallenden und zuerst so unverständlichen Erscheinungen, das plötzliche Aufhören der α-Strahlen und die zuweilen auftretenden plötzlichen Umbiegungen derselben, Erscheinungen, die zunächst aller Erklärung zu spotten schienen.

Eine genaue mathematische Verfolgung dieses Vorganges, bei dem das α-Teilchen durch die Ladung des Kerns abgelenkt wird, zeigt, daß diese Ablenkung abhängen muß von der Größe der positiven Ladung des Kerns, und zwar von dem Quadrat derselben. Und indem man die Versuchsresultate nach dieser Theorie prüfte — wobei vollständige Übereinstimmung sich ergab —, konnte man aus der beobachteten Größe der Ablenkung berechnen, wie groß die Ladung des positiven Kerns der verschiedenen Atome ist, wenn man die des Wasserstoffs gleich 1 setzt. Dabei zeigte es sich, daß bei den verschiedenen Atomen die Ladung des zentralen Kerns ungefähr die Größe des *halben* Atomgewichts hat, wenn man die des Wasserstoffs als Einheit nimmt. Also Helium mit dem Atomgewicht 4 zeigt eine positive Ladung des Kerns gleich 2, Kohlenstoff mit dem Atomgewicht 12 eine solche gleich 6, Sauerstoff mit dem Atomgewicht 16 eine solche gleich 8, Schwefel mit dem Atomgewicht 32 eine solche gleich 16.

Das ist zunächst ein sehr überraschendes Resultat, welches aber eine noch überraschendere Erklärung findet. Wenn man sich nämlich sämtliche Elemente nach dem *periodischen System*, also nach den Atomgewichten, ordnet, so ist die Stelle, welche die obengenannten Elemente einnehmen, gerade gleich der Hälfte des Atomgewichts. Es ordnen sich nämlich die ersten Elemente so:

1. Wasserstoff, 2. Helium, 3. Lithium, 4. Beryllium, 5. Bor, 6. Kohlenstoff, 7. Stickstoff, 8. Sauerstoff, 9. Fluor, 10. Neon, 11. Natrium, 12. Magnesium, 13. Aluminium, 14. Silicium, 15. Phosphor, 16. Schwefel usw.

Also die *Ordnungszahl* im periodischen System der Elemente ergibt sich gleich der positiven Ladung des Kerns des Atoms oder, mit anderen Worten, *die Zahl der positiven Elementarladungen, welche der Kern besitzt, bestimmt seine Ordnungszahl im periodischen System, bestimmt also auch sein Atomgewicht.* Denn die Reihenfolge der Elemente im periodischen System ist im allgemeinen (bis auf einige Ausnahmen) die Reihenfolge der Atomgewichte.

Daraus aber ergibt sich eine ganz neue und überraschende Betrachtungsweise. Die positive Ladung des Kernes bestimmt zugleich die Masse des Atoms. Das heißt aber nichts anderes als: die Masse des Atoms ist eine Eigenschaft, die bloß von seiner Ladung abhängt, *die Masse des Atoms ist scheinbare Masse*, ganz so, wie die Masse des negativen Elektrons scheinbare Masse ist.

Das ist eine Folgerung und ein Schluß von außerordentlicher Kühnheit! Sagt er doch nichts anderes aus, als daß die Masse der Körper, die wir von Jugend auf gewohnt sind, als das Reellste, Tatsächlichste anzusehen, daß diese bloß ein täuschender Schein ist. Die ersten Erfahrungen, die ein Kind macht, indem es sich an einer Tischkante stößt, geben ihm den bestimmten und unauslöschlichen Eindruck der Tatsächlichkeit der Masse. Die Masse erscheint dem Kind und erscheint uns als das Deutlichste und Erste, was wir von den Körpern der Natur wissen. *Und dieses Deutlichste und Erste erklären wir nun als einen Schein.* Nicht daß wir die Wirkungen der Masse leugnen, wie sie das Kind an der Tischkante erfährt, oder wie sie der Soldat, der von einem Schrapnell getroffen wird, erfährt. Aber wir erklären, daß diese Wirkung nicht herrührt von einem besonderen Etwas, das wir als Masse bezeichnen, sondern daß sie nur herrührt von den *Ladungen*, die der Kern des Atoms trägt, daß diese Masse also nichts ist, als eine Folge aus der Ladung, daß sie also nicht das Erste, an sich Einleuchtende, für sich Bestehende ist, sondern daß sie ein Zweites, ein aus der Ladung Folgendes, ein ohne diese Ladung nicht Bestehendes ist. Wir leugnen mit einem Wort, daß die Masse etwas Primäres, den Körpern Innewohnendes ist, wir erklären vielmehr die elektrischen Ladungen als das Primäre und die Masse nur als eine Folge aus diesen Ladungen. Wer jemals wissenschaftlich oder technisch Mechanik studiert hat, dem wird gleich zu Anfang seines Studiums die Masse der Körper als etwas aus der Erfahrung Gewonnenes hingestellt, das man nicht näher definieren kann noch will, sondern das etwas Gegebenes ist. Dieses schlechthin Gegebene leugnen wir jetzt, wir führen es zurück auf ein anderes, auf die elektrische Ladung, von der zur Zeit, als die Mechanik schon in der höchsten Blüte stand und bis zur Vollkommenheit entwickelt war, noch niemand ahnen konnte, daß sie schließlich die Ursache der Masse ist.

Wenn nun aber die Masse der Atome bloß *scheinbare Masse* ist, so können wir uns auch sofort einen Einblick verschaffen in die Dimension dieser positiv geladenen Kerne. Denn nach der S. 27 angeführten Formel ist

$$\text{Masse} = \frac{2}{3} \frac{\text{Quadrat der Ladung (elektrostatisch)}}{\text{Radius des Elektrons} \times \text{Quadrat der Lichtgeschwindigkeit.}}$$

Die Masse eines Wasserstoffatoms ist nach S. 10 gleich $1{,}64 \cdot 10^{-24}$ g. Die Elementarladung ist nach S. 20 gleich $4{,}74 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten. Folglich ist der

$$\text{Radius des Wasserstoffkerns} = \frac{2}{3} \cdot \frac{22\,5 \cdot 10^{-20}}{1{,}64 \cdot 10^{-24} \cdot 9 \cdot 10^{20}} = 1{,}0 \cdot 10^{-16} \text{ cm}.$$

Da wir oben S. 27 gefunden hatten, daß der Radius eines (negativen) Elektrons gleich $1{,}9 \cdot 10^{-13}$ cm ist, so sehen wir, daß der positive Kern, der die ganze Masse des Wasserstoffatoms enthält, rund einen 2000mal kleineren Radius als selbst ein Elektron hat.

Denken wir uns wieder das Atom (von der Größe 10^{-8} cm) so vergrößert, daß es den Raum der Erdkugel vom Radius 6350 km einnimmt, so hat der Kern des Wasserstoffatoms bloß einen Radius von 6 cm, entspricht also etwa der Größe eines Kinderballs, während ein negatives Elektron in derselben Vergrößerung dem Raum einer großen Kirche entspricht, da sein Radius 120 m beträgt.

Von derselben Größe wie der Radius eines Wasserstoffkerns kann auch der Radius eines α-Teilchens sein. Denn da dieses ein Heliumatom mit der doppelten Ladung ist und da die Masse des Heliumatoms 4mal so groß ist, wie die des Wasserstoffatoms, so ist der Radius des Heliumkernes, also des α-Teilchens, derselbe wie der des Wasserstoffkernes. Indes kann man sich davon auch eine andere Vorstellung machen, die wir später besprechen werden.

Wenn wir annehmen wollten, daß alle Atome, bis zu den schwersten, nur aus einem *einzigen* Kern beständen, so könnten wir ebenso die Radien aller dieser Kerne berechnen. Denn die Zahl der Ladungen der Atome ist durch ihre Ordnungszahl im periodischen System bestimmt und ihre Masse ist durch ihr Atomgewicht gegeben. Aber da wir wenigstens von den schwersten Atomen, denen des Radiums, Thoriums, Aktiniums, Urans, bereits wissen, daß in ihnen Heliumkerne vorhanden sind, so werden wir diese und vermutungsweise die meisten anderen Atome als Konglomerate einer mehr oder minder großen Anzahl solcher Kerne ansehen müssen, von denen wir bisher allerdings nur die Heliumkerne nachweisen können, bei denen es aber möglich (und wie wir sehen werden, bei manchen Atomen tatsächlich der Fall) ist, daß sie auch andere Kerne, z. B. Wasserstoffkerne mit einfacher Ladung enthalten könnten.

Wenn wir aber den zentralen Kern der schwereren Atome als ein Konglomerat, eine Aneinanderreihung von einfacheren Kernen ansehen müssen, so folgt noch ein weiteres daraus. Eine Anzahl positiv geladener Kerne, seien das nun Heliumkerne oder Wasserstoffkerne oder Kerne anderer Art, kann nicht ohne weiteres ein Konglomerat, eine Aneinanderreihung bilden, weil ja die verschiedenen positiven Kerne sich gegenseitig abstoßen müssen. Damit sie aneinandergereiht bleiben, ist notwendig, daß in dem Gesamtkern auch noch negative Elektronen vorhanden sind, die die Anziehung, das Aneinanderschließen der verschiedenen Einzelkerne bewirken. Wir müssen also bei den schwereren Atomen, sicher bei denen der radioaktiven Substanzen, aber vermutlich auch bei vielen anderen, den zentralen Kern aus einfacheren positiven

Kernen in Verbindung mit einer mehr oder minder großen Anzahl von negativen Elektronen gebildet ansehen. Da aber durch jedes negative Elektron im Kern die gesamte positive Ladung um eine Einheit verringert wird, so müssen um so mehr positive Einzelkerne zusammentreten, um die Ordnungszahl des Elementes zu ergeben. Zum Beispiel ein Element von der Ordnungszahl 92 (Uran) würde, wenn es bloß aus Heliumkernen zusammengesetzt ist, 46 solche Kerne verlangen. Damit diese zusammenhalten, müssen noch eine Anzahl, und zwar eine gerade Anzahl negativer Elektronen dazutreten. Bei 2 negativen Elektronen brauchte man 47 Heliumkerne, bei 4 negativen Elektronen 48 Heliumkerne usf. Aus dem Atomgewicht des Urans 238,2 und dem des Heliums 4 würde folgen, daß höchstens 59 Heliumkerne und 26 negative Elektronen im Kern des Uranatoms enthalten sein können. Man sieht, daß, um über die Konstitution der Atome Bestimmtes aussagen zu können, ebensoviele Möglichkeiten geprüft und mit den Tatsachen verglichen werden müssen, wie es in der Chemie bei den komplizierten Molekülen mit sehr vielen Atomen der Fall ist. Ein ganz neues Gebiet, die Strukturchemie der Atome, analog der Strukturchemie der Moleküle, sehen wir als eine Aufgabe der kommenden Zeit vor uns.

Was nach dieser neuen Auffassung ein Atom kennzeichnet, ein Atom von allen anderen unterscheidet, ist also der *Kern*, d. h. die positive Ladung, die der Kern besitzt. Ein Wasserstoffatom ist gekennzeichnet durch einen Kern mit *einer* Elementarladung, ein Heliumatom durch einen solchen mit *zwei* Elementarladungen. Um diese Kerne bewegen sich nun in Kreisen oder Ellipsen negative Elektronen herum, die aber eben nicht den Kern bilden. Ist kein solches Elektron in der Anziehung des Wasserstoffkerns, so sprechen wir nach der heutigen Ausdrucksweise von einem positiven Wasserstoffion H^+, Das ist dann eben nichts anderes als der Kern. Ist *ein* negatives Elektron in seiner Anziehungssphäre, so sprechen wir heute von einem (neutralen) Wasserstoffatom H. Ist noch ein zweites negatives Elektron in der Anziehungssphäre, so sprechen wir von einem negativen Wasserstoffion H^-. Ebenso kann man beim Helium unterscheiden doppelt positiv geladene Heliumatome He^{++}, die nichts anderes sind, als der Kern oder das α-Teilchen; bei Anlegung eines oder mehrerer negativer Elektronen werden daraus einfach positiv geladene Heliumatome He^+, dann neutrale Heliumatome He, endlich könnten negativ geladene Heliumatome H^- und H^{--} entstehen. Alle diese verschiedenen Stoffe von verschiedenem optischem und elektrischem Verhalten sind aber Helium, weil sie alle charakterisiert sind durch denselben Kern.

Man muß also bei den schwereren, zusammengesetzten Atomen unterscheiden zwischen den negativen Elektronen, die im Kern selbst sitzen, die wir als *Kernelektronen* bezeichnen wollen, und die den Zusammenhalt des Kernes sichern, und den negativen Elektronen, die außerhalb des Kerns um ihn herum sich bewegen, in mehr oder minder großem Abstand.

Eine Zu- oder Abnahme der letzteren ändert das Atom nicht, ändert den Stoff nicht. Der Stoff ist durch die positive Ladung des Kerns bestimmt. Dagegen eine Zu- oder Abnahme der negativen Kernelektronen ändert das Atom, den Stoff, verwandelt ihn in einen neuen Stoff, ebenso wie eine Zu- oder Abnahme von α-Teilchen in dem Kern den Stoff verändert. Verfolgen wir von

diesem Gesichtspunkt aus jetzt wieder die radioaktiven Umwandlungen, so werden wir erkennen, daß wir bei den schweren Atomen, welche in dem positiven Kern noch Kernelektronen enthalten, zu einer Erweiterung unserer Begriffe genötigt sind; wir werden nämlich erkennen, *daß zwei Atome, die wir nach unseren Betrachtungen als chemisch gleichartig betrachten müssen und die auch chemisch sich ganz gleich verhalten, daß diese doch verschiedene Atomgewichte haben können.* Das widerspricht der bisherigen Auffassung des Atoms ganz direkt. Denn das Hauptmerkmal des Atoms, durch welches eine Art von Atomen von einer anderen Art unterschieden wurde, bildete eben bisher gerade das Atomgewicht.

Wenn nämlich ein Stoff mit einer bestimmten Kernladung ein α-Teilchen aussendet, so vermindert sich dadurch seine Kernladung um 2 Einheiten. Wenn er aber dann ein β-Teilchen, d. h. ein Kernelektron, aussendet, so vermindert sich seine positive Kernladung um eine negative Einheit, d. h. seine positive Kernladung nimmt um eine Einheit zu. Und wenn er dann noch ein β-Teilchen aussendet, so ist seine Kernladung wieder genau dieselbe wie im Anfang, es ist also wieder dasselbe Atom, d. h. das chemisch gleichwertige Atom, gebildet. Und doch sind die Atomgewichte dieser beiden Stoffe, des ursprünglichen und des nach Verlust von einem α-Teilchen und zwei β-Teilchen entstehenden, verschieden. Denn die Masse der Atome sitzt im wesentlichen in den positiven Kernladungen, also hier in den α-Teilchen. Die β-Teilchen haben nur den 1835. Teil der Masse eines Wasserstoffatomes, tragen also nur unwesentlich zur ganzen Masse des Atoms bei. Und man sieht: der nach Ausstoßung von einem α-Teilchen und zwei β-Teilchen gebildete Körper hat ein um 4 Einheiten kleineres Atomgewicht als der ursprüngliche. Aber da die positive Kernladung ja bei beiden dieselbe ist, so unterscheiden sich die beiden Körper chemisch nicht, sie gehören insbesondere an dieselbe Stelle des periodischen Systems. Die beiden Atome sind nicht identisch, ihre Unterschiede sind uns ja bekannt, da sie verschiedene Zahlen von α- und β-Teilchen im Kern enthalten, aber chemisch können wir sie nicht trennen.

Man nennt solche Elemente, welche die gleiche Kernladung besitzen, aber sich dabei durch die Zahl der positiven *und* negativen Ladungen im Kern unterscheiden, *isotope Elemente.* Sie stehen an derselben Stelle des periodischen Systems und lassen sich chemisch nicht voneinander unterscheiden, obwohl sie verschiedene Atomgewichte haben.

Solche Fälle sind bei der Untersuchung der radioaktiven Stoffe vielfach beobachtet worden, und erst durch die Kerntheorie der Atome sind sie verständlich geworden.

Um das an einem Beispiel durchzuführen, gehen wir von dem gewöhnlichen Uran (Uran I) aus, das ein Atomgewicht 238,5 besitzt und dessen Kernladung, wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, zu 92 bestimmt ist.

Wir beachten: Durch Aussendung eines α-Teilchens vermindert sich das Atomgewicht um 4 Einheiten und die Kernladung vermindert sich um 2 Einheiten. Dagegen durch Aussendung eines β-Teilchens wird das Atomgewicht nicht (wesentlich) geändert, die Kernladung vergrößert sich aber dabei um eine positive Einheit.

Die schon oben angeführte Umwandlungsreihe des Urans durch das Ionium in das Radium gibt danach folgendes.

Umwandlungsreihe .	Uran I $\xrightarrow{\alpha}$	Uran X $\xrightarrow{\beta}$	Brevium $\xrightarrow{\beta}$	Uran II $\xrightarrow{\alpha}$	Ionium $\xrightarrow{\alpha}$
Kernladung . . .	92	90	91	92	90
Atomgewicht . . .	238,5	234,5	234,5	234,5	230,5

Umwandlungsreihe .	Radium $\xrightarrow{\alpha}$	Radiumemanation $\xrightarrow{\alpha}$		RadiumA $\xrightarrow{\alpha}$	RadiumB $\xrightarrow{\beta}$
Kernladung . . .	88	86		84	82
Atomgewicht . . .	226,5	222,5		218,5	214,5

Umwandlungsreihe .	RadiumC$_1$ $\xrightarrow{\alpha\beta}$	RadiumD $\xrightarrow{\beta}$	RadiumE $\xrightarrow{\beta}$	RadiumF $\xrightarrow{\alpha}$	(Rad. G ?) $\rightarrow$
Kernladung . . .	83	82	83	84	82
Atomgewicht . . .	214,5	210,5	210,5	210,5	206,5

Aus dieser Reihe erkennt man, daß die Kernzahl 84 den Elementen Radium A und Radium F (Polonium) zukommt. Dies sind also isotope Elemente. (Das Radium C′, das aus Radium C$_1$ durch Verlust eines β-Teilchens entsteht, ist auch isotop mit Radium A.)

Ferner kommt die Kernzahl 83 den Elementen Radium E und Radium C$_1$ zu, es sind das also auch isotope Elemente.

Endlich besitzen die Kernzahl 82 die Elemente Radium B, Radium D und das unbekannte Endprodukt der Reihe Radium G.

Welches dieses Endprodukt ist, darüber hat man schon lange die Vermutung gehegt, daß es das *Blei* ist, dessen Kernladung 82 und dessen Atomgewicht 207,2 ist. Da nun das Radium B und Radium D isotop mit dem Radium G sind, so müssen diese auch Blei sein, resp. von Blei chemisch und physikalisch mit Ausnahme des Atomgewichts nicht zu unterscheiden sein. Und es folgt daraus, daß es Blei von verschiedenem Atomgewicht geben muß, je nach seiner Bildung, nämlich solches, welches z. B. aus Radium D besteht, und solches, welches aus Radium G besteht, deren Atomgewichte 210,5 und 206,5 sind, während das gewöhnliche Blei das Atomgewicht 207,2 besitzt. Diese Folgerung ist durch exakte Versuche von *Hönigschmidt* experimentell bestätigt worden, bei denen er tatsächlich durch sehr genaue Messungen bei Blei, welches in reiner Pechblende, also einer radioaktive Stoffe enthaltenden Substanz enthalten war, das Atomgewicht 206 statt des gewöhnlichen 207,2 gefunden hat. Die großen Differenzen, die theoretisch beim Atomgewicht des Bleis vorkommen könnten — zwischen 214,5 (Radium B) und 206,5 (RadiumG) — können praktisch natürlich nicht vorkommen, weil das Radium B, D und G immer nur in minimalen Quantitäten vorhanden sein kann. Wenn man noch die anderen radioaktiven Reihen hinzunimmt, so findet man, daß mit dem Blei nicht bloß Radium B, D und Radium G, sondern auch Thorium B und Aktinium B isotop sind.

Eine vollständige Durchführung dieser Betrachtungen ist aber zurzeit noch nicht möglich, da über die aufeinanderfolgenden radioaktiven Umwandlungen in manchen Fällen die Beobachtungen noch nicht genügende Sicherheit bieten.

Aber anderseits steht uns nun die Möglichkeit vor Augen, daß auch bei

den gewöhnlichen Elementen, nicht bloß bei den radioaktiven, Isotopen vorhanden sein können, daß zwei Elemente gleiche Kernladung haben und sich chemisch vollständig identisch verhalten können, und daß sie doch verschiedenes Atomgewicht haben können, weil der Kern, trotz gleicher Ladung, verschiedene Struktur besitzt. Solche zwei Substanzen können wir chemisch nicht auseinanderhalten, das Atomgewicht aber des Stoffes, der aus zwei Isotopen von verschiedenem Mengenverhältnis besteht, und den wir als einheitlich ansehen, wird einen Wert haben, der zwischen den beiden Atomgewichten der Isotopen liegt. Hier sehen wir eine Möglichkeit, woher die starke Abweichung der Atomgewichte von ganzen Zahlen (oben S. 3) kommen mag, die ja in vielen Fällen ganz sicher ist, — z. B. Chlor mit 35,46 — obwohl anderseits viele Atomgewichte sehr nahe an der Ganzzahligkeit liegen. *Ein* Mittel bietet aber die Physik, um solche Isotopen vielleicht zu erkennen, wenigstens im gasförmigen Zustand. Wenn man nämlich in einem solchen Gas Kanalstrahlen erzeugt, so wird die spezifische Ladung der Kanalstrahlen eine andere sein, wenn die positive Ladung an dem Atom des einen oder des anderen Isotopen haftet. Und durch die *Kanalstrahlenanalyse* (S. 30) muß sich das erkennen lassen, da die beiden isotopen Kanalstrahlen zwei verschiedene Ablenkungsparabeln ergeben müssen. In der Tat hat vor kurzem der englische Physiker *Aston* nach dieser Methode nachgewiesen, daß das *Chlor* aus zwei Isotopen von Atomgewicht 35 und 37 besteht, und daß ebenso in dem *Neon* zwei Isotopen von Atomgewicht 20 und 22 (Neon und Metaneon) vorhanden sind. Wenn auch diese Versuche bisher noch nicht von anderer Seite bestätigt sind, so kann man doch hoffen und glauben, daß auf diese Weise sich das schwer lösbare Rätsel der starken Abweichung mancher Atomgewichte von der Ganzzahligkeit lösen wird.

VIERTER VORTRAG

DIE SPEKTRA DER RÖNTGENSTRAHLEN UND DIE KERNTHEORIE DER ATOME

*Beugungserscheinungen als Beweis für die Wellennatur des Lichts * Die Beugung der Röntgenstrahlen durch die Kristalle * Die Braggsche Auffassung der Beugungsbilder * Röntgenspektra * Die K-, L- und M-Linien * Das Moseleysche Gesetz der Hochfrequenzspektra * Reihenfolge der Elemente und Lücken im periodischen System*

DIE Kerntheorie der Atome hat eine unerwartete, aber glänzende Bestätigung gefunden durch die neuesten Untersuchungen über Röntgenstrahlen.

Die wissenschaftliche Erforschung der Röntgenstrahlen hat bekanntlich seit ihrer Entdeckung (1895) bis zum Jahre 1912 sehr geringe Fortschritte gemacht. Man hat schon seit ihrer ersten Entdeckung gewußt, daß es Röntgenstrahlen verschiedener Art gibt, die man im großen und ganzen als *harte* und *weiche* Röntgenstrahlen unterscheidet. Der Unterschied liegt darin, daß harte Strahlen von einem Körper, z. B. einem Stück Aluminium bestimmter Dicke, wenig absorbiert werden, während weiche Strahlen von demselben Körper stark absorbiert werden. Jede Röntgenröhre sendet sowohl harte wie weiche Strahlen in verschiedener Zusammensetzung aus, sie gibt eine *inhomogene* Strahlung, nicht eine Strahlung, die nur eine einzige Qualität besitzt, und die man als homogene Strahlung bezeichnet. Die für den Physiker wichtigste Frage, welcher Natur diese Strahlen sind, ob sie Korpuskularstrahlen sind oder ob sie den Lichtstrahlen ähnliche Vorgänge sind, diese Frage konnte zu keiner direkten Entscheidung gebracht werden, obwohl allerdings die weit überwiegende Wahrscheinlichkeit für die zweite der beiden Möglichkeiten sprach. Aber wenn die Röntgenstrahlen auch manche Eigenschaften mit den Lichtstrahlen gemein zu haben schienen, so waren doch anderseits so erhebliche Verschiedenheiten zwischen beiden vorhanden, daß eine Entscheidung nicht getroffen werden konnte.

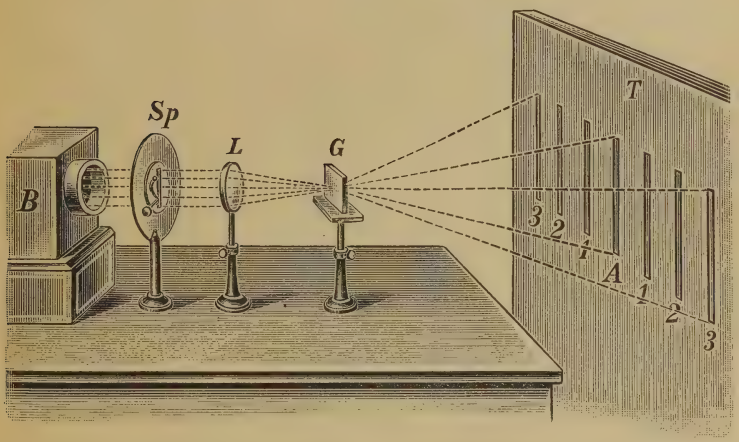
Das Licht besteht bekanntlich in einer Wellenbewegung. Es pflanzt sich durch den Raum fort mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km pro Sekunde. Die Wellenlänge der Lichtstrahlen ist außerordentlich klein, und zwar für die verschiedenen Farben verschieden. Die roten Lichtstrahlen haben eine Wellenlänge von ungefähr 760 millionstel Millimeter, die violetten eine solche von ungefähr 380 millionstel Millimeter. Man drückt jetzt diese kleinen Wellenlängen zweckmäßig in einer Einheit aus, die ein zehnmillionstel Millimeter (10^{-8} cm) beträgt, und die man eine Ångström-Einheit (A.E.) nennt. So ist also die Wellenlänge der äußersten roten Strahlen etwa 7600 A.E., die der äußersten violetten etwa 3800 A.E.

Die Wellentheorie des Lichtes scheint zunächst der direkten Beobachtung zu widersprechen. Denn das Licht breitet sich, wie die einfachsten Beobachtungen zeigen, von einem leuchtenden Körper nur in *Strahlen* und nur *geradlinig* fort, und geht nicht um Hindernisse, um schattenwerfende Körper herum, während eine Wellenbewegung sich ganz anders verhält. Wenn die Wellen eines Teiches auf ein Hindernis treffen, auf einen Felsblock, der aus dem Wasser hervorragt, so sieht man von den Rändern des Blockes aus die Wellen sich hinter ihn ziehen, das Wasser hinter dem Block kommt ebenfalls in

Schwingungen, die Wellen sind um ihn herumgegangen. Auch bei dem Schall, der ja eine Wellenbewegung der Luft ist, wissen wir, daß er um Hindernisse, um Ecken herumgeht; man hört den Schall einer Schallquelle auch um Ecken herum. Bei dem Licht aber scheint das nicht der Fall zu sein. Läßt man die Lichtwellen auf einen undurchsichtigen Schirm fallen, so sieht man hinter dem Schirm nichts, es scheint das Licht nicht um die Ecken des Hindernisses herumzugehen.

Aber in Wirklichkeit scheint das nur so. Tatsächlich geht das Licht auch um Ecken herum, es wird durch Hindernisse von seiner geradlinigen Bahn abgelenkt, und gerade diese Tatsache ist der Beweis dafür, daß man das Licht trotz des gegenteiligen Anscheines als eine Wellenbewegung ansehen muß. Wegen der Kleinheit der Wellenlängen des Lichts darf man aber auch nur

Fig. 19.



sehr enge, kleine Hindernisse in seinen Weg stellen, um eine merkbare Abbiegung des Lichts von seiner geraden Bahn zu erkennen. Dies geschieht in der Optik am vollkommensten durch Anwendung eines sogenannten *Beugungsgitters*. Ein solches wird am einfachsten so hergestellt, daß auf eine Glasplatte durch eine sehr feine Teilmaschine eine große Reihe feiner Striche in gleichen Abständen voneinander eingeritzt werden. Schon wenn 100 oder 200 Striche pro Millimeter vorhanden sind, sieht man, daß das durchgehende Licht sehr weit von seiner geradlinigen Bahn abgebeugt wird. In Fig. 19 ist ein bekannter Versuch, wie er in der Optik ausgeführt wird, dargestellt, der diese Ablenkung, man nennt sie *Beugung des Lichts*, objektiv zeigt. Von einer Lichtquelle (Bogenlampe) B geht das Licht (das man durch ein rotes Glas, das es passieren muß, einfarbig gemacht hat) durch einen engen Spalt Sp, und von einer Linse L wird das Licht auf eine Tafel T geworfen und gibt dort ein helles, scharfes, rotes Bild A des Spaltes. Wenn man aber in den Gang der Lichtstrahlen bei G das Beugungsgitter stellt, so sieht man sofort außer dem direkten Bild des Spaltes bei A noch eine Reihe seitlicher Bilder 1, 2, 3, rechts und links vom mittleren Spaltbild. Es sind dies die abgebeugten Bilder, welche ganz direkt

zeigen, daß hinter dem Gitter das Licht nicht nur geradlinig sich fortpflanzt, sondern auch nach den Seiten abgelenkt wird. Daß man dabei nur eben einzelne helle Beugungsbilder 1, 2, 3 erhält und nicht die ganze Tafel mehr oder minder hell sieht, kommt daher, daß durch die vielen Öffnungen des Gitters viele einzelne Wellenzüge zu jeder Stelle der Tafel hineilen, aber wegen der Kleinheit ihrer Wellenlängen sich an den meisten Stellen durch Interferenz aufheben, und nur an einzelnen Stellen, eben den Stellen 1, 2, 3, sich gegenseitig verstärken. Die abgebeugten Bilder stehen um so weiter auseinander und um so weiter von der Mitte fort, je größer die Wellenlänge des angewendeten Lichtes ist. Wenn man daher als Lichtquelle ein gemischtfarbiges Licht anwendet, so bringt ein Beugungsgitter von selbst eine *Trennung* der verschiedenen Farben, der verschiedenen Wellenlängen hervor. Die kurzwelligen Farben geben Beugungsbilder näher am Mittelbild, die langwelligen weiter vom Mittelbild. Bei Anwendung des weißen Lichts der Sonne oder der Bogenlampe erhält man so an Stelle der einzelnen Linien 1, 2, 3 ausgedehnte *Spektra*, in denen alle Farben von Blau bis Rot sich aneinanderschließen.

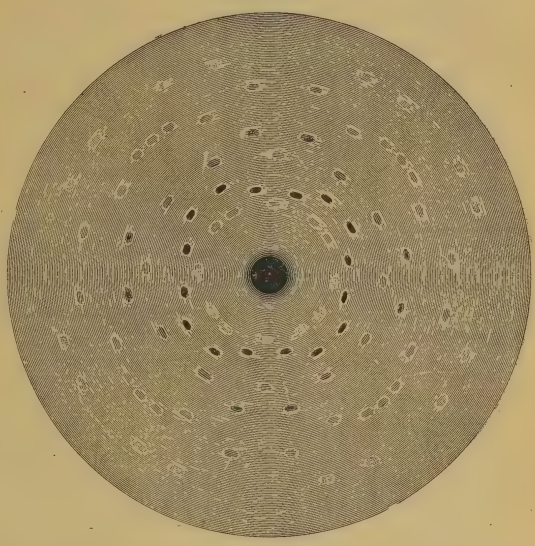
Diese Beugungserscheinungen bilden in der Optik den strengen Beweis für die Wellennatur des Lichts. Sie beweisen zu gleicher Zeit zwei für jede Wellenbewegung charakteristische Eigenschaften des Lichts, nämlich erstens die Interferenz des Lichts, d. h. die Tatsache, daß zwei Lichtwellen sich unter gewissen Umständen aufheben können, und zweitens die Abweichung von der geradlinigen Fortpflanzung, das Um-die-Ecke-Biegen des Lichts.

Wollte man nun die Wellennatur der Röntgenstrahlen beweisen, so war es notwendig, zu zeigen, daß man durch sie auch Beugungserscheinungen erhalten kann. Aber als man selbst die feinsten Beugungsgitter anwendete, die man herstellen kann, Gitter, bei denen mehr als 1700 Striche auf den Millimeter angebracht waren, so zeigten doch die Röntgenstrahlen keine Spur von Abweichung von ihrer geradlinigen Bahn, keine Spur von Beugung. Dieses negative Resultat ist aber kein Beweis *gegen* die Wellennatur der Röntgenstrahlen, sondern es konnte daran liegen, daß die Wellenlängen der Röntgenstrahlen noch außerordentlich viel kleiner sind, als die der Lichtwellen. Die Öffnungen der Beugungsgitter müssen, damit das Gitter wirksam sei, so eng sein, daß sie höchstens etwa 20 bis 50 Wellenlängen umfassen, je enger sie sind, desto besser. Wenn also die Wellenlänge der Röntgenstrahlen 1000mal kleiner sein sollte, als die des violetten Lichts, so sind die Gitteröffnungen viel zu groß, um merkliche Beugung bei ihnen hervorzubringen. Man müßte vielmehr Gitter herstellen, bei denen nicht 1000 bis 2000, sondern 1 000 000 Striche auf den Millimeter kommen. Aber das ist eine Aufgabe, die mechanisch unausführbar ist.

Hier aber ist durch eine vortreffliche Idee von Prof. *Laue* ein unerwarteter und zum Ziele führender Fortschritt gemacht worden. Statt den unmöglichen Versuch zu unternehmen, Gitter von der gewünschten und notwendigen Feinheit künstlich herzustellen, kam *Laue* auf die Idee, daß die Natur ja selbst Gitter von dieser Feinheit uns zur Verfügung stellt. In den *Kristallen* nämlich ordnen sich die Atome der Körper gitterförmig an, es bestehen in ihnen abwechselnd Schichten, welche von Atomen eingenommen werden, und zwischen diesen Schichten sind freie Räume, und zwar ist der Abstand dieser Schichten voneinander von der Größe $8 \cdot 10^{-8}$ cm, also 8 A.E., mithin gerade von der

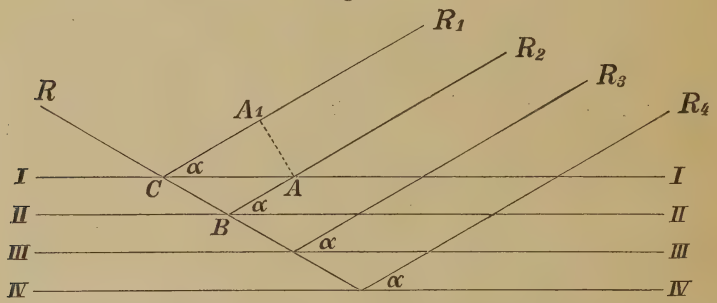
Größe, wie wir sie oben für notwendig erklärt hatten, um selbst 1000mal kleinere Wellen als die des sichtbaren Lichts zu beugen. Der Versuch mit solchen Kristallen glückte nun vollkommen, es gelang tatsächlich, Beugungserscheinungen zu erhalten, wenn man ein dünnes Bündel von Röntgenstrahlen durch eine Kristallplatte hindurchgehen ließ. Fig. 20 zeigt ein so erhaltenes Beugungsbild, bei welchem die Röntgenstrahlen durch einen Kristall aus Zinkblende hindurchgeschickt wurden und dann auf eine photographische Platte fielen. Die Mitte der Figur, der starke schwarze Fleck, zeigt den direkten Durchstoßungspunkt des angewendeten Bündels von Röntgenstrahlen, der bei nur geradliniger Fortpflanzung allein vorhanden sein müßte. Aber außer diesem zentralen Fleck sieht man noch eine große Anzahl anderer, und zwar symmetrisch verteilter Flecke von geringerer oder größerer Dunkelheit. Diese Flecke entstehen durch die Beugung in dem Kristallgitter und zeigen dieselbe Symmetrie, wie sie die benutzte Kristallfläche zeigt. Der Zinkblendekristall hat nämlich in derjenigen Richtung, in der die Röntgenstrahlen durch ihn gesendet wurden, eine sogenannte vierzählige Achse. Das heißt, wenn man den Kristall um diese Achse herumdreht, so erhält man viermal, je bei einer Drehung um 90°, Lagen, die einander ganz gleichwertig sind. Und ebenso sieht man in dem Beugungsbild, daß zu jedem Fleck noch drei weitere gleiche gehören, die um je 90° voneinander abstehen. Die Symmetrie des Kristalls spiegelt sich also in dem Beugungsbild wider. Dieser Umstand hat bewirkt, daß diese Interferenzen von Röntgenstrahlen bereits eine äußerst wichtige und erfolgreiche Methode der Kristallographie bilden, durch welche die nähere Konstitution, die Anordnung der Atome im Kristall, bis ins einzelne untersucht werden kann. Für die Physik aber war eine andere Folgerung aus dieser Erscheinung von besonderer Wichtigkeit, man konnte nämlich aus dieser Figur die Wellenlänge der angewendeten Röntgenstrahlen bestimmen. Es zeigte sich, daß die verschiedenen Beugungsflecke durch Wellenlängen verschiedener Größe (die ja in der angewendeten inhomogenen Röntgenstrahlung vorhanden waren) gebildet wurden, und die Berechnung ergab, daß in den angewendeten Röntgenstrahlen verschiedene Wellenlängen von 0,3 bis zu 1,5 A.E. enthalten sind. Diese Wellen sind 600- bis 3000mal kleiner als die Wellenlängen des äußersten Ultraviolett, das man bisher erzeugen und messen konnte, und das noch eine Wellenlänge von 1000 A.E. besitzt.

Fig. 20.



Das Auftreten dieser Interferenzerscheinungen beim Durchgang der Röntgenstrahlen durch Kristalle läßt sich in einer sehr bequemen und weiterführenden Art verstehen durch eine Betrachtungsweise, die zuerst von *Bragg* eingeführt wurde. In einem Kristall nämlich haben wir ein ganzes Netz von einander durchschneidenden Ebenen, von denen jede mit Atomen besetzt ist. Und zwar ist *eine Reihe von parallelen Ebenen* immer in bestimmter Weise mit Atomen besetzt, eine *andere Reihe* von parallelen Ebenen, die schief zu der ersten liegt, ist in anderer Weise mit Atomen besetzt, eine dritte Reihe von parallelen Ebenen ist wieder anders besetzt usw. Wir wollen jede solche Reihe von gleichartigen parallelen Ebenen als ein *System von Netzebenen* bezeichnen. Wir wollen in Fig. 21 annehmen, daß die Ebenen I, II, III, IV ein solches System von Netzebenen darstellen, und daß ein paralleles Bündel von Röntgenstrahlen R_1, R_2, R_3, R_4 von bestimmter Wellenlänge λ auf diese Netzebenen nahezu streifend, also unter einem sehr kleinen Winkel α (den man den *Glanzwinkel* nennt) auffällt. Dann gehen von den Auffallspunkten aus sekundäre Röntgenstrahlen nach allen Richtungen aus, die sich aber durch Interferenz

Fig. 21.



im allgemeinen gegenseitig vernichten. Nur wenn die Wellenlänge der Röntgenstrahlen in einer ganz bestimmten Beziehung zu dem Glanzwinkel steht, vernichten sie sich nicht, sondern verstärken sich, und zwar so, daß dann ein Bündel Röntgenstrahlen in der Richtung R den Kristall verläßt, also in solcher Richtung, *als ob das Strahlenbündel R_1 bis R_4 von den Netzebenen direkt reflektiert worden wäre.* Diese Verstärkung tritt dann ein, wenn der Unterschied der Wege zweier aufeinanderfolgender Strahlen (der Gangunterschied) eine *ganze* Wellenlänge beträgt (oder auch zwei, drei ganze Wellenlängen). Der Gangunterschied der Strahlen R_2 und R_1 ist aber gleich $A\,B + B\,C - A_1\,C$. Dieser Weg muß gleich einer Wellenlänge sein. (Die Beziehung, die sich daraus zwischen der Wellenlänge λ und dem Glanzwinkel α und dem Abstand der parallelen Netzebenen d ergibt, ist einfach die, daß $\lambda = 2\,d \sin \alpha$ ist.) Daraus folgt nun aber weiter, daß wenn das unter dem Winkel α auffallende Strahlenbündel nicht nur eine einzige Wellenlänge besitzt, also *nicht homogen* ist, sondern aus vielen Wellenlängen gemischt ist, daß dann in der Richtung R nur *ein* Strahl des Bündels herausgeht, nämlich derjenige, der gerade die bestimmte Wellenlänge λ besitzt. Ist eine solche Wellenlänge in dem auffallenden Bündel nicht enthalten, so wird von diesen Netzebenen unter diesem

Glanzwinkel nichts reflektiert. Ist diese Wellenlänge in dem Bündel enthalten, so wird nur der Strahl mit dieser Wellenlänge reflektiert. Das sagt aber aus, daß der Kristall aus einem Gemisch von Wellenlängen unter diesem Winkel eine bestimmte Wellenlänge absondert und diese reflektiert, daß er also aus den inhomogenen Röntgenstrahlen eine *homogene*, oder wie man es nennt, *monochromatische* Strahlung in der Richtung R hervorbringt.

Was für den einen Glanzwinkel α gilt, daß er aus den inhomogenen Röntgenstrahlen denjenigen von der Wellenlänge λ aussondert und ihn reflektiert, das gilt für einen anderen Glanzwinkel α^1 für eine andere Wellenlänge λ^1. Daraus folgt aber, daß wenn ein nicht paralleles, sondern divergentes Bündel Röntgenstrahlen von verschiedenen Wellenlängen auf einen solchen Kristall auftrifft, daß dann der Kristall die einzelnen Wellenlängen nach verschiedenen Richtungen hin reflektiert, daß er also durch Reflexion *einen Fächer von Strahlen* bildet, von denen jeder eine ganz bestimmte Wellenlänge hat. Denn die nicht parallelen Strahlen bilden verschiedene Glanzwinkel mit den Netzebenen und unter jedem dieser Winkel wird dann ein Strahl von anderer Wellenlänge reflektiert. *Der Kristall zerlegt also das auftreffende inhomogene Strahlenbündel in ein Spektrum von Röntgenstrahlen, so daß nach jeder Richtung nur ein Strahl von ganz bestimmter Wellenlänge reflektiert wird.* So wie wir in der Optik durch ein Prisma das weiße auffallende Licht in ein Spektrum zerlegen, indem jede Farbe, jedes Licht von anderer Wellenlänge, unter anderem Winkel gebrochen wird und die Farben dadurch getrennt werden, so zerlegt ein Kristall eine auf ihn auffallende inhomogene Röntgenstrahlung von verschiedenen Wellenlängen in ein *Röntgenspektrum*, indem durch Reflexion die einzelnen Strahlen verschiedener Wellenlänge getrennt werden.

Damit haben wir aber eine Methode der *Röntgenspektroskopie* gewonnen, eine Methode, welche nicht bloß erlaubt, die Röntgenstrahlen verschiedener Wellenlänge zu trennen, sondern welche auch erlaubt, diese Wellenlängen direkt zu messen. Man braucht bloß bei einem bestimmten Kristall, bei dem der Abstand der Netzebenen durch kristallographische Betrachtungen bekannt ist, den Glanzwinkel für jeden Strahl zu bestimmen, um daraus die Wellenlänge zu erhalten.

Solche Messungen hat nach *Bragg* zuerst der junge englische Physiker *Moseley* ausgeführt, der als ein Opfer des Weltkrieges in Gallipoli gefallen ist. Es zeigte sich bei diesen Untersuchungen, daß, wie erwähnt, jede Röntgenröhre eine inhomogene, gemischte Strahlung aussendet. Und zwar erhält man ein Spektrum, welches *alle* möglichen Wellenlängen innerhalb gewisser Grenzen enthält, welches also dem Spektrum eines weißen Körpers entspricht. Außerdem aber erhält man in dem Spektrum bestimmte, *sehr starke einzelne Linien*, also ganz bestimmte Wellenlängen. Diese bestimmten, starken Wellenlängen hängen ab von der Natur des Metalls, aus dem die Antikathode der Röhre besteht. Man bezeichnet sie als die *charakteristische Strahlung* des Metalls der Antikathode. Diese scharfen Linien der charakteristischen Strahlung sind es ganz besonders, welche bisher der Messung und Untersuchung unterworfen wurden und welche für unsere Betrachtungen besonders wichtig sind.

Bei der Ausführung dieser Messungen hat es sich als vorteilhaft erwiesen, den Kristall nicht fest aufzustellen, weil dabei Unregelmäßigkeiten der

reflektierenden Fläche störend wirken, sondern ihn vielmehr um seine Achse langsam zu drehen, wodurch die störenden Einflüsse der Fläche sich im Mittel aufheben. Die reflektierten Strahlen fallen auf eine photographische Platte, die sich in einer Kassette befindet. Eine Anordnung des Apparates, wie sie von Prof. *Siegbahn* in Lund, von dem die genauesten und umfassendsten Untersuchungen dieser Spektra herrühren, dafür ausgeführt wurde, zeigt Fig. 22. Auf einer Marmorplatte steht eine Säule, die zwei Blenden B_1 und B_2 aus Blei trägt, deren spaltförmige Öffnung verkleinert oder vergrößert werden kann. Durch diese Spalte dringen die Röntgenstrahlen auf die Kristallplatte K, die durch ein Uhrwerk U langsam hin und her gedreht wird, und bei welcher Vorrichtungen zum genauen Justieren angebracht sind. Das reflektierte Spektrum fällt auf eine Kassette P, die die photographische Platte trägt. Die

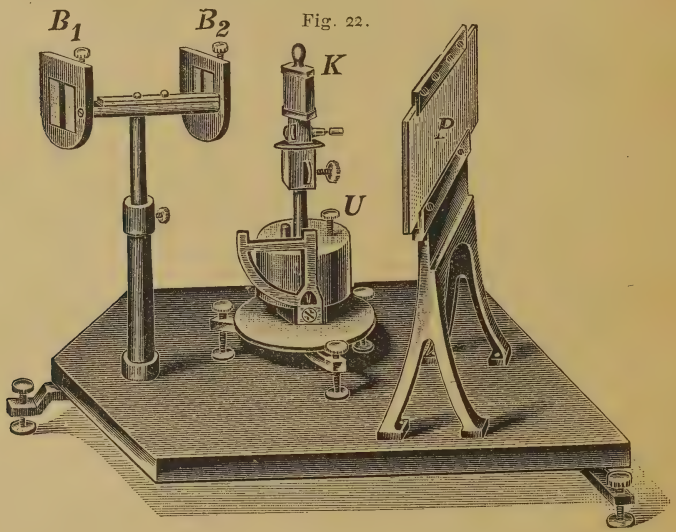


Fig. 22.

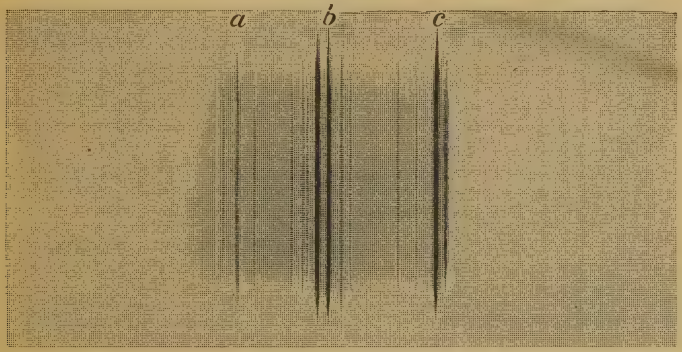
Spektra, die man so erhält, werden z. B. durch Fig. 23 dargestellt, bei der man auf dem allgemein verdunkelten Untergrund eine Reihe von scharfen Linien sieht, eben die charakteristischen Linien, und zwar hier von einer Platinantikathode.

Jedes Metall, als Antikathode einer Röhre genommen, zeigt solche Linien von bestimmter Wellenlänge. Die Versuche haben nun ergeben, daß die Wellenlängen dieser charakteristischen Linien um so kürzer werden, je größer das Atomgewicht des betreffenden Metalls ist. Und dabei hat es sich weiter gezeigt, daß bei den leichteren Elementen, vom Natrium bis zum Neodym, die Linien alle denselben Bau haben. Man nennt sie die K-Linien oder das *K-Spektrum*. Sie bestehen nämlich immer aus fünf Linien, die man als $K\alpha_1$, $K\alpha_2$, $K\beta_1$, $K\beta_2$ und $K\gamma$ bezeichnet. Unter diesen sind die Linien $K\alpha_1$ und $K\alpha_2$, die nahe beieinander liegen, am stärksten. Ebenso bilden die β-Linien eine enge Doppellinie und bei einigen Stoffen ist auch die γ-Linie doppelt. Diese Linien sind bei allen genannten Stoffen vorhanden. Besteht die Kathode aus

einer Legierung, z. B. Messing, so zeigen sich die Linien der beiden Bestandteile, des Kupfers und des Zinks, zusammen auf der Platte. Ja wenn die Antikathode bloß mit dem Salz eines Metalles bedeckt ist, so zeigen sich die Linien der betreffenden Bestandteile, also z. B. bei Chlorkalium die Linien des Chlors und die des Kaliums.

Bei den schwereren dieser Elemente, vom Zink an, findet man aber noch ein zweites von dem ersten getrennten Liniensystem von bedeutend größeren Wellenlängen, als sie die K-Linien haben. Man bezeichnet diese als das *L-Spektrum*. Es besteht aus 10 bis 14 Linien, von denen wieder die stärkste als die $L\alpha_1$-Linie bezeichnet wird. Auch hierbei nimmt die Wellenlänge der Linien mit steigendem Atomgewicht der Elemente ab. Bei den schwersten Elementen vom Neodym an bis zum Uran ist nur die L-Reihe bisher gefunden worden,

Fig. 23.



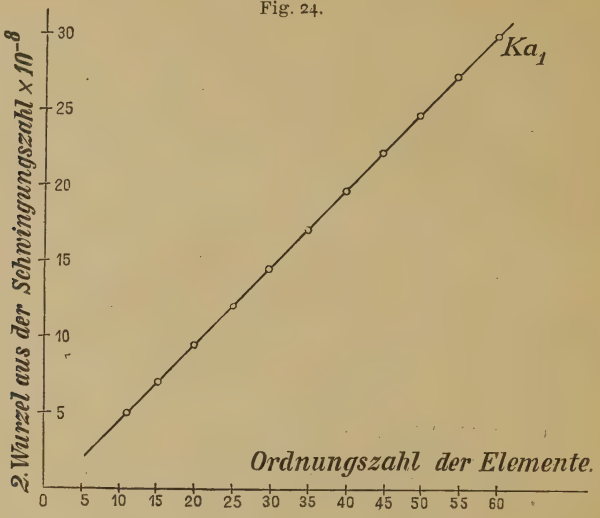
nicht die K-Reihe. Dagegen ist bei den allerschwersten Elementen, vom Dysprosium bis zum Uran, noch ein langwelligeres Spektrum, das *M-Spektrum*, gefunden worden, welches aus 3 bis 5 Linien, zum Teil Doppellinien, besteht.

Die Wellenlänge der $K\alpha_1$-Linie für einige Elemente ist in der folgenden Tabelle angegeben, in welcher außerdem noch die Atomgewichte der betreffenden Elemente und die Nummer der Elemente im periodischen System, die *Ordnungszahl*, verzeichnet ist.

Ordnungszahl	Element	Atomgewicht	Wellenlänge von $K\alpha_1$ in 10^{-8} cm
11	Natrium	23,00	11,951
15	Phosphor	31,04	6,168
20	Calcium	40,07	3,355
25	Mangan	54,93	2,093
30	Zink	65,37	1,437
35	Brom	79,92	1,035
40	Zirkon	90,6	0,788
45	Rhodium	102,9	0,615
50	Zinn	118,7	0,487
55	Cäsium	132,81	0,398
60	Neodym	144,3	0,330

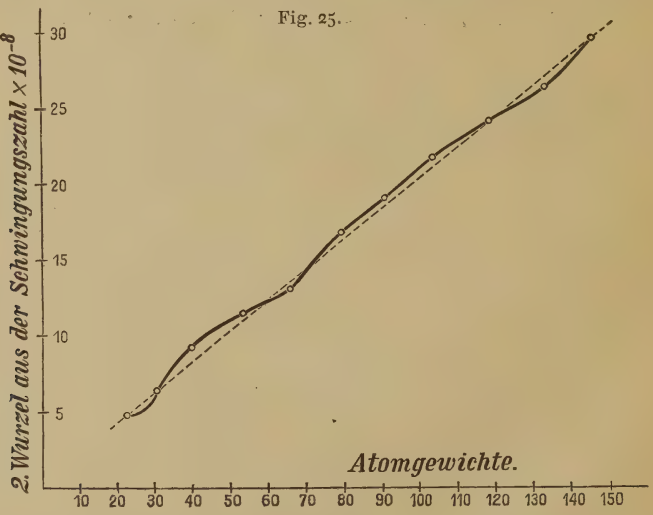
Statt der Wellenlänge führen wir besser die *Schwingungszahl* ein, welche um so größer ist, je kleiner die Wellenlänge ist. Man erhält die Schwingungszahl (d. h. die Zahl der Schwingungen pro Sekunde) aus der Wellenlänge, wenn

Fig. 24.



man mit der Wellenlänge in die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Ätherbewegungen, welche gleich $3 \cdot 10^{10}$ cm/sek ist, hineindividiert. Mit wachsendem

Fig. 25.



Atomgewicht werden die Wellenlängen der K-Linien immer kleiner, also werden die Schwingungszahlen der K-Schwingungen immer größer, und zwar zeigt es sich, daß die Quadratwurzeln aus den Schwingungszahlen ungefähr ebenso wachsen wie die Atomgewichte.

Moseley hat aber zuerst erkannt, daß ein sehr einfacher und glatter Zusammenhang nicht zwischen der Schwingungszahl (ihrer Quadratwurzel) und dem Atomgewicht, sondern *zwischen der Schwingungszahl (ihrer Quadratwurzel) und der Ordnungszahl der Elemente* besteht.

In der folgenden Tabelle sind die Schwingungszahlen ν für die obigen Substanzen angegeben und zugleich die Quadratwurzeln aus den Schwingungszahlen.

$K\alpha_1$-Strahlung.

Ordnungszahl	Element	Atomgewicht	Schwingungszahl ν von $K\alpha_1$	Quadratwurzel aus der Schwingungszahl
11	Natrium . . .	23,00	$0{,}2510 \cdot 10^{18}$	$5{,}010 \cdot 10^{8}$
15	Phosphor . .	31,04	0,4863 „	6,973 „
20	Calcium . . .	40,07	0,8942 „	9,456 „
25	Mangan . . .	54,93	1,433 „	11,97 „
30	Znk	65,37	2,088 „	14,44 „
35	Brom	79,92	2,898 „	17,03 „
40	Zirkon . . .	90,6	3,808 „	19,51 „
45	Rhodium . .	102,9	4,878 „	22,08 „
50	Zinn	118,7	6,160 „	24,82 „
55	Caesium . . .	123,81	7,537 „	27,45 „
60	Neodym . . .	144,3	9,090 „	30,15 „

Die einfache Abhängigkeit der Schwingungszahl von der Ordnungszahl ergibt sich sofort aus Fig. 24. Trägt man nämlich in horizontaler Richtung die Ordnungszahlen ein und in vertikaler Richtung die Quadratwurzeln aus den Schwingungszahlen, so liegen alle diese Punkte, die man so erhält, genau und *ganz scharf auf einer geraden Linie.*

Das sagt aus: *Die Quadratwurzel aus den Schwingungszahlen hängt linear zusammen mit der Ordnungszahl der Elemente.*

Sucht man ebenso die Beziehung zwischen der Quadratwurzel aus der Schwingungszahl und dem Atomgewicht herzustellen, so erhält man die Kurve Fig. 25, welche zwar im allgemeinen denselben Verlauf hat, welche aber an verschiedenen Stellen deutliche Abweichungen von der geraden Linie zeigt, Abweichungen, die größer sind, als der Genauigkeit der Messungen entspricht.

Man kann das auch direkt, ohne die Kurven, aus den obigen Zahlen sehen. Bilden wir nämlich aus obiger Tabelle z. B. die Quotienten der Differenzen nach dem Schema

$$\frac{\text{Cäsium—Phosphor}}{\text{Brom—Phosphor}},$$

so geben diese für die Wurzeln aus den Schwingungszahlen

$$\frac{20{,}477}{10{,}057} = 2{,}036$$

für die Ordnungszahlen

$$\frac{40}{20} = 2{,}000$$

und für die Atomgewichte

$$\frac{101{,}77}{48\,88} = 2{,}082.$$

Die ersten Quotienten stimmen also besser überein, als die letzteren. Der Unterschied ist nicht groß, aber deutlich vorhanden.

Daraus ziehen wir also den Schluß: *die Quadratwurzeln aus den Schwingungszahlen der Röntgenschwingungen hängen direkt und einfach ab von der Ordnungszahl der Elemente, nicht von ihrem Atomgewicht.*

Dieser Schluß gilt aber nicht bloß für die K-Strahlung, sondern auch für die weichere L-Strahlung, die bis zu den Elementen von höchstem Atomgewicht verfolgt werden konnte. In der folgenden Tabelle sind ebenso für eine Reihe von Elementen die Ordnungszahlen, Atomgewichte, Wellenlängen der Linie $L\alpha_1$, ihre Schwingungszahlen und die Wurzeln daraus angegeben.

$L\alpha_1$-Strahlung.

Ordnungszahl	Element	Atomgewicht	Wellenlänge von $L\alpha_1$	Schwingungszahl	Quadratwurzel aus der Schwingungszahl
30	Zink	65,37	$12{,}346 \cdot 10^{-8}$	$0{,}2430 \cdot 10^{18}$	$4{,}930 \cdot 10^{8}$
35	Brom	79,92	8,391 „	0,3575 „	5,978 „
40	Zirkon . . .	90,6	6,083 „	0,4932 „	7,023 „
45	Rhodium .	102,9	4,596 „	0,6527 „	8,079 „
50	Zinn	118,7	3,594 „	0,8346 „	9,135 „
55	Cäsium . .	132,81	2,891 „	1,037 „	10,19 „
60	Neodym . .	144,3	2,369 „	1,267 „	11,27 „
74	Wolfram .	184,0	1,471 „	2,040 „	14,28 „
80	Quecksilber	200,6	1,240 „	2,420 „	15,55 „
82	Blei	207,2	1,175 „	2,554 „	15,98 „
88	Radium . .	226,0	1,010 „	2,970 „	17,23 „
90	Thorium . .	232,15	0,957 „	3,135 „	17,71 „
92	Uran . . .	238,2	0,911 „	3,293 „	18,14 „

Daß auch in diesen Zahlen ein glatter, linearer Zusammenhang der Quadratwurzeln aus den Schwingungszahlen mit den *Ordnungszahlen, nicht mit den Atomgewichten* besteht, können wir ebenso erkennen, wenn wir z. B. die Quotienten der Differenzen nach dem Schema bilden:

$$\frac{\text{Thorium—Zink}}{\text{Neodym—Zink}}.$$

Das gibt für die Wurzeln aus den Schwingungszahlen:

$$\frac{12{,}78}{6{,}34} = 2{,}016,$$

für die Ordnungszahlen

$$\frac{60}{30} = 2{,}000$$

und für die Atomgewichte

$$\frac{166\,78}{78{,}93} = 2{,}113.$$

Die Abweichungen der ersten beiden Quotienten voneinander betragen bloß $^3/_4$ Proz., dagegen die der ersten und dritten 5 Proz.

Das beweist wieder, und zwar hier noch schärfer, daß die Wurzeln aus den Schwingungszahlen in linearer Weise von den *Ordnungszahlen* abhängen.

Und dasselbe gilt für die noch weicheren M-Strahlen von denen in der folgenden Tabelle die entsprechenden Zahlen für die Mα-Linie (nach *Stenström*) bei einer Anzahl von Elementen angegeben sind.

Mα - Strahlung.

Ordnungszahl	Element	Atomgewicht	Wellenlänge von Mα	Schwingungszahl	Quadratwurzel aus der Schwingungszahl
66	Dysprosium .	162,5	$9{,}509 \cdot 10^{-8}$	$0{,}3155 \cdot 10^{18}$	$5{,}617 \cdot 10^{8}$
70	Aldebaranium	173,8	8,123 „	0,3693 „	6,077 „
74	Wolfram . . .	184,0	6,973 „	0,4302 „	6,559 „
79	Gold	197,2	5,819 „	0,5156 „	7,180 „
82	Blei	207,1	5,275 „	0,5687 „	7,541 „
90	Thorium . . .	232,4	4,129 „	0,7266 „	8,525 „
92	Uran	238,5	3,901 „	0,7690 „	8,769 „

Die Verhältnisse

$$\frac{\text{Uran—Dysprosium}}{\text{Gold—Dysprosium}}$$

geben für die Wurzeln aus den Schwingungszahlen

$$\frac{3{,}152}{1{,}563} = 2{,}017,$$

für die Ordnungszahlen

$$\frac{26}{13} = 2{,}000$$

und für die Atomgewichte

$$\frac{76{,}0}{34\,7} = 2{,}191,$$

so daß auch hier die Ordnungszahlen nicht die Atomgewichte maßgebend sind.

Das in dieser Weise ausgesprochene Gesetz nennt man das *Moseleysche Gesetz der Hochfrequenzspektra.* Man bezeichnet nämlich die Röntgenspektra wegen ihrer sehr großen Schwingungszahlen als Hochfrequenzspektra. Das *Moseley*sche Gesetz sagt aus: *die Quadratwurzeln der Schwingungszahlen sind lineare Funktionen der Ordnungszahlen der Elemente.* Es drückt sich durch die einfache Gleichung aus, wenn ν die Schwingungszahl, N die Ordnungszahl des Elementes und a und c Konstanten bedeuten,

$$\sqrt{\nu} = c\,(N - a).$$

Die Konstanten c und a sind für die K-Strahlung andere als für die L-Strahlung und als für die M-Strahlung.

Diese Ergebnisse sind nun ein nachträglicher, aber sehr überzeugender Beweis für die *Rutherford*sche Kerntheorie der Atome. Die Schwingungen der

Röntgenstrahlen hängen wesentlich ab von den *Ordnungszahlen* der Elemente, also von den *Kernen*, die Schwingungszahlen wachsen in regelmäßiger Weise mit der Ladung des Kerns.

Von einer periodischen Änderung der Schwingungszahlen mit wachsender Kernzahl, wie bei dem chemischen Verhalten der Elemente ist keine Rede. Daraus folgt, daß die in der Chemie auftretenden Periodizitäten, die im periodischen System der Elemente ihren Ausdruck gefunden haben, *nicht abhängen können von der Kernladung, sondern nur von der Anordnung der äußeren Elektronen*, von der wir bisher noch nicht gesprochen haben.

Aber aus diesem einfachen gesetzmäßigen Verhalten der Hochfrequenzschwingungen haben wir nun eine unwidersprechliche Methode gewonnen, erstens um die *Reihenfolge* der Elemente im periodischen System, wo sie etwa zweifelhaft ist, genau festzustellen, zweitens, um bestimmt zu sagen, wo etwa noch *Lücken*, noch unentdeckte Elemente im System enthalten sind, und endlich, um namentlich die große Lücke, die bisher zwischen dem Cer und dem Tantal klaffte, in korrekter Weise auszufüllen.

Was erstens die Reihenfolge der Elemente betrifft, so waren schon lange einige Fälle bekannt, in denen die Anordnung nach den Atomgewichten nicht die richtige Stellung gab. Die drei Elemente Eisen, Kobalt und Nickel ordnen sich nach ihrem chemischen Verhalten in der angeführten Reihenfolge. Aber die Atomgewichte sind 55,84; 58,97; 58,68, so daß danach das Nickel vor das Kobalt gehört. Die Messung der Wellenlängen für $K\alpha_1$ ergab für Eisen den Wert 1,928, für Kobalt 1,781, für Nickel 1,653 (A.E.), so daß die Quadratwurzeln aus den Schwingungszahlen 12,47, 12,98 und 13 47 . 10^8 sind, woraus unzweifelhaft folgt, daß die Kernladung des Nickels um 1 höher, als die des Kobalts ist, daß also die richtige Reihenfolge der Elemente im System hier *nicht die Reihenfolge der Atomgewichte* ist.

Ebenso hatte man schon lange erkannt, daß das Tellur mit dem Atomgewicht 127,5 in die sechste Kolumne des Systems (zu Schwefel Selen) gehört, während das Jod mit dem kleineren Atomgewicht 126,92 in die siebente Kolumne (zu Chlor, Brom) gehört, also trotz niedrigeren Atomgewichts nach dem Tellur zu stehen kommt. Die Röntgenspektren geben für $K\alpha_1$ bei Tellur 0,456, bei Jod 0,437 (A.E.) als Wellenlängen, für die Wurzeln aus den Schwingungszahlen also 25,65 . 10^8 und 26,20 . 10^8, so daß dadurch bewiesen ist, daß die richtige Reihenfolge hier auch *nicht mit der Reihenfolge der Atomgewichte* übereinstimmt. Ebenso steht unzweifelhaft das Argon (Atomgewicht 39,88) vor dem Kalium (Atomgewicht 39,10).

Die größte Lücke bestand im periodischen System lange zwischen dem Cer mit dem Atomgewicht 140,25 und dem Tantal mit dem Atomgewicht 181,5, eine Lücke, in welche die seltenen Erden hineinfielen, von der man aber nicht einmal wußte, mit wie vielen Elementen sie ausgefüllt werden mußte. Die Untersuchung der L-Spektra gab sofort die Antwort auf die letztere Frage. Denn das Cer entsprach nach der linearen Beziehung unzweifelhaft der Ordnungszahl 58, und das Tantal ebenso unzweifelhaft der Ordnungszahl 73, so daß zwischen diese beiden Elemente noch 14 andere gehörten. Von diesen waren das Praseodym, Neodym, Samarium, Terbium, Holmium, Erbium, Tulium, Gadolinium schon lange bekannt, andere (das Europium Dysprosium, Aldebaranium, Cassiopeium) sind später gefunden worden, zwei sind noch unbekannt.

	0	I a	I b	II a	II b	III a	III b	IV a	IV b	V a	V b	VI a	VI b	VII a	VII b	VIII
	1 H 1,008	**2** He 4,00	**3** Li 6,94		**4** Be 9,1		**5** B 11,0		**6** C 12,00		**7** N 14,01		**8** O 16,00		**9** F 19,0	
—		**10** Ne 20,2	**11** Na 23,00		**12** Mg 24,32		**13** Al 27,1		**14** Si 28,3		**15** P 31,04		**16** S 32,06		**17** Cl 35,46	
—		**18** A 39,88	**19** K 39,10		**20** Ca 40,07		**21** Sc 45,1		**22** Ti 48,1	**23** V 51,0		**24** Cr 52,0		**25** Mn 54,93		**26** Fe 55,84 **27** Co 58,97 **28** Ni 58,68
—				**29** Cu 63,57		**30** Zn 65,37		**31** Ga 69,9		**32** Ge 72,5		**33** As 74,96		**34** Se 79,2		**35** Br 79,92	
		36 Kr 82,92	**37** Rb 85,45		**38** Sr 87,63		**39** Y 88,7		**40** Zr 90,6	**41** Nb 93,5		**42** Mo 96,0		**43** — —		**44** Ru 101,7 **45** Rh 102,9 **46** Pd 106,7
—				**47** Ag 107,88		**48** Cd 112,40		**49** In 114,8		**50** Sn 118,7		**51** Sb 120,2		**52** Te 127,5		**53** J 126,92	
—		**54** X 130,2	**55** Cs 132,81		**56** Ba 137,37		**57** La 139,0		**58** Ce 140,25 **59** Pr 140,9 **60** Nd 144,3 **61** — — **62** Sm 150,4 **63** Eu 152,0 **64** Gd 157,3 **65** Tb 159,2 **66** Dy 162,5 **67** Ho 163,5 **68** Er 167,7 **69** Tu 168,5 **70** Ad 173,5 **71** Cp 175,0 **72** — —						
—										**73** Ta 181,5		**74** W 184,0		**75** — —		**76** Os 190,9 **77** Ir 193,1 **78** Pt 195,2
—				**79** Au 197,2		**80** Hg 200,6		**81** Tl 204,0		**82** Pb 207,20		**83** Bi 208,0		**84** Po (210,0)		**85** — —	
—		**86** Em (222,0)	**87** — —		**88** Ra 226,0		**89** Ac (227)		**90** Th 232,15	**91** Pa (230)		**92** U 238,2					

Es ist also nun durch diese Untersuchungen festgestellt, daß vom Wasserstoff bis zum Uran 92 verschiedene Elemente und nicht mehr vorhanden sind, abgesehen von den kurzlebigen *Isotopen* (S. 45) die an derselben Stelle wie einzelne von den bekannten langlebigen Elementen stehen. Bei der Anordnung dieser Elemente im periodischen System machen die seltenen Erden eine Schwierigkeit. Sie sind eine Klasse für sich, die sich der sonst im periodischen System zeigenden Gesetzmäßigkeit nicht einfügt. Danach ergibt sich für das periodische System mit den 9 Kolumnen, von denen die Kolumne 0 und 8 einfachen, die übrigen zweifachen Eingang zeigen, die auf S. 61 stehende Anordnung (nach *Fajans*) wobei jedes Element seine Ordnungsnummer nebenangesetzt und darunter sein Atomgewicht (O = 16) enthält. Außer zwei unbekannten seltenen Erden Nr. 61 und 72 sind bloß vier Stoffe 43, 75 85 und 87 unbekannt. Die radioaktiven Stoffe 84 Polonium, 86 Emanium, 89 Aktinium, 91 Protaktinium sind vermutungsweise eingefügt.

Nachdem so die Kerntheorie der Atome eine sehr feste Stütze in der Beobachtung der *Hochfrequenzspektra* gewonnen hat, werden wir mit großem Vertrauen an sie herangehen können, um ihre weiteren Folgerungen zu untersuchen.

Damit ein Atom neutral, unelektrisch sei, wie es die Atome der Körper im allgemeinen sind, muß jedes Atom ebensoviel freie negative Elektronen außerhalb des Kernes besitzen, als es positive Elementarladungen im Kern hat. Wir werden also erwarten müssen, daß ein neutrales Atom des Wasserstoffs 1 Elektron, das des Heliums 2 usw., endlich das des Urans 92 negative Elektronen im Außenraum besitzt. Es kann aber ein Atom auch weniger oder mehr von solchen negativen Elektronen an sich haben. Im ersteren Fall ist es dann ein positives Atomion mit einer oder mehreren freien positiven Elementarladungen, im letzteren Fall ein negatives Atomion mit einer oder mehreren freien negativen Ladungen. Aus der *Valenz* der Atome, aus der Tatsache, daß die Atome chemisch eine gewisse *Wertigkeit* besitzen, daß sie ein-, zwei-, drei-, vier- oder mehrwertig sind, werden wir schließen dürfen, daß diese Elektronen im Außenraum sich noch verschieden verhalten, daß im allgemeinen die meisten von ihnen unter normalen Umständen ziemlich fest mit dem Kern zusammenhängen, daß aber einzelne von ihnen, nämlich bei einwertigen Stoffen eines, bei zweiwertigen zwei, bei dreiwertigen drei usw., leichter an den Kern gefesselt sind, so daß sie leichter von ihm getrennt oder leichter ihm zugefügt werden können. Denn mit diesen Valenzelektronen verbinden sich die Atome zu Molekülen. Da z. B. ein Kupferion positiv zweiwertig ist, so werden wir annehmen dürfen, daß es nicht die 29 negativen Elektronen enthält, die das Atom im neutralen Zustand enthalten würde, sondern nur 27, und daß die zwei fehlenden Elektronen eben seine Zweiwertigkeit bedingen. Umgekehrt wird das negative zweiwertige Sauerstoffion außer den 8 Elektronen, die das neutrale Sauerstoffatom hat, noch leicht 2 negative Elektronen in seinen Verband hineinnehmen können. Jedoch über die Art und Weise, wie die negativen Elektronen, die um den Kern herumliegen oder kreisen, im Außenraum des Kerns angeordnet sind, darüber ist zunächst eine Entscheidung aus den bisher angeführten Tatsachen nicht zu treffen, wenn auch manche dieser Tatsachen, namentlich das *Moseleysche* Gesetz, noch eine weitere Erklärung eben aus dieser Konstitution des Atoms erfordern.

Über die *positiven Kernladungen* der Atome aber kann man noch verschiedenfache Ansichten hegen. Die *positive Kernladung* des Wasserstoffatoms ist ein kleines Volumen (vom Radius 10^{-16} cm), das *eine* Elementarladung enthält. *Rutherford* ist geneigt, diesen Wasserstoffkern als das *positive Elektron* anzunehmen, so daß die Kernladungen aller anderen Elemente sich aus diesen positiven Wasserstoffkernen und den nötigen negativen Elektronen zusammensetzen. Es ist das im wesentlichen die *Proutsche Hypothese* (oben S. 3). Der Einwand, den wir gegen diese erhoben haben, daß danach die Atomgewichte aller Stoffe *ganze Zahlen* sein müßten, was sie nicht sind, erfährt hier aber zunächst eine Milderung. Denn das Atomgewicht setzt sich zusammen aus der Masse des Kerns und der Masse der negativen Elektronen, wobei übrigens alle diese Massen *scheinbar* sind. Wenn nun auch die scheinbare Masse eines negativen Elektrons nur $^1/_{1835}$ von der Masse eines Wasserstoffatoms ist, so erkennt man doch, daß wenn viele solche negative Elektronen im Kern und im Außenraum vorhanden sind, zunächst kleine Abweichungen von der Ganzzahligkeit der Atomgewichte auftreten können. Dazu aber kommt noch folgendes. Falls die negativen Elektronen im Außenraum des Kerns sich *bewegen* und falls ihre Geschwindigkeit unter Umständen bei dem einen oder anderen Atom etwa sehr groß ist, d. h. vergleichbar mit der Lichtgeschwindigkeit wird, so wird auch die scheinbare Masse derselben sehr groß, und unter diesen Umständen könnten sogar starke Abweichungen von der Ganzzahligkeit der Atomgewichte eintreten. Also ist der Einwand, der gegen die *Prout*sche Hypothese früher mit Recht gemacht wurde, hier nicht mehr durchschlagend, da man über die Zahl der negativen Elektronen im Kern und Außenraum zusammen innerhalb gewisser Grenzen frei verfügen kann. Ja noch mehr. Die Masse eines Wasserstoffkerns hängt, da sie ja scheinbare Masse ist (S. 42), auch etwas davon ab, ob andere positive oder negative Ladungen in ihrer unmittelbaren Nähe sich befinden. Sie kann dadurch größer oder kleiner werden. Auch dadurch sind kleine Abweichungen der Atomgewichte von ganzen Zahlen nach oben und unten möglich. Dazu kommt noch, daß die starken Abweichungen, welche einzelne Atomgewichte von der Ganzzahligkeit zeigen, wenn die Untersuchungen von *Aston* (oben S. 47) stichhaltig sind, auf der Existenz von Isotopen beruhen, also nicht gegen die Zusammensetzung aus Wasserstoffkernen sprechen.

Anderseits aber ist die Annahme, daß der Wasserstoffkern das positive Elektron selbst sei, und daß es bloß *eine* Art positiver Elektronen gäbe, zunächst durch nichts als durch unseren Wunsch nach Einheitlichkeit begründet. In diesem Falle müßte also z. B. der Heliumkern mit dem Atomgewicht 4 und mit zwei positiven Ladungen — also das α-Teilchen — zusammengesetzt sein aus vier Wasserstoffkernen und zwei negativen Elektronen. Sein Radius wäre dann nicht mehr von der Größenordnung 10^{-16} cm, sondern wegen der Größe der negativen Elektronen von der Größenordnung 10^{-13} cm. Außer beim Wasserstoff würden also die Kerne mindestens ein so großes Volumen besitzen, wie die Elektronen selbst. Daß aber in der Tat Wasserstoffkerne in anderen Kernen enthalten sind, wird durch die Zerlegung des Stickstoffatomes bewiesen, welche *Rutherford* entdeckt hat, und welche in dem sechsten Vortrag besprochen ist.

FÜNFTER VORTRAG

DIE LINIENSPEKTRA UND DAS BOHRSCHE ATOMMODELL

*Die Erzeugung und das Aussehen der Linienspektra * Analogie mit Schallschwingungen nicht vorhanden * Das Balmersche Gesetz * Die Balmersche Serie im Wasserstoff * Die ultraroten Wasserstofflinien * Die Rydbergsche Zahl * Serienlinien * Die Bohrsche Atomkonstruktion * Energiequantum und Wirkungsquantum * Die Radien der Kreise und die Geschwindigkeiten der Elektronen * Die Loslösungsarbeit * Das Bohrsche Atom gibt für den Wasserstoff genau die Balmerschen Serienlinien und die Rydbergsche Konstante * Das Heliumatom * Die Ionisierungsspannung * Die komplizierten Atome * Die Hochfrequenzspektra und das Moseleysche Gesetz * Die Leistungen und die Schwierigkeiten des Bohrschen Atommodells*

DIE empfindlichste Methode, durch welche die Chemie vor der Entdeckung der Radioaktivität die kleinsten Spuren von Stoffen erkennen konnte und zugleich die Methode, durch welche es ihr gelang, eine ganze Anzahl neuer Elemente zu entdecken, ist bekanntlich die *Spektralanalyse*. Sie beruht darauf, daß man das Licht, welches glühende Dämpfe oder leuchtende Gase aussenden, durch einen Spalt und ein Prisma gehen läßt und es dadurch zu einem Spektrum ausbreitet. Dann erscheint nicht, wie bei einem weißglühenden festen Körper, ein ausgedehntes Band, welches alle Farben von Rot bis Violett lückenlos aneinandergereiht enthält, nicht ein vollständiges Spektrum, sondern es erschienen nur einige oder mehrere, zuweilen viele getrennte farbige *Linien*. Man erhält ein sogenanntes *Linienspektrum*.

Die Linien, welche dabei auftreten, sind so charakteristisch für die chemischen Elemente, welche in dem leuchtenden Dampf vorhanden sind, daß man aus dem Auftreten bestimmter Linien umgekehrt das Vorhandensein des betreffenden Elements konstatieren kann. Statt eines Prismas zur Erzeugung und Untersuchung des Spektrums verwendet man bei den genauesten Untersuchungen ein *Beugungsgitter*, am besten ein *Rowland*sches Gitter, welches aus einer Fläche von Spiegelmetall besteht, in welche pro Millimeter 1700 feine Striche in gleichen Abständen eingeritzt sind. Läßt man das Licht eines leuchtenden Dampfes oder eines leuchtenden Gases durch einen Spalt gehen und auf ein solches Gitter fallen, so erhält man im reflektierten Licht zu beiden Seiten des direkten Spaltbildes die Beugungsspektra, und zwar ein erstes, zweites, drittes Spektrum in zunehmend größerem Winkelabstand von dem direkten Spaltbild. Aus dem genau zu messenden Winkelabstand, welchen eine Linie in einem dieser Beugungsspektra von dem mittleren Spaltbild besitzt, und aus der Zahl der Gitterstriche pro Millimeter auf dem Gitter kann man — und das ist die Hauptmethode für diese Messungen — mit großer Genauigkeit die Wellenlänge der betreffenden farbigen Linie messen.

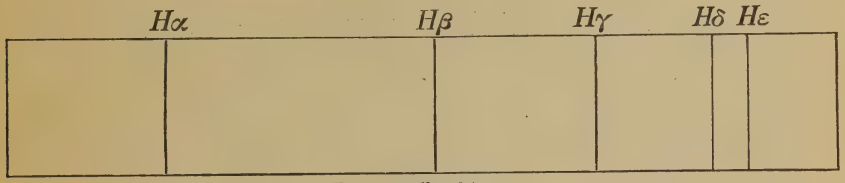
Die Wellenlängen aller Farben sind sehr kleine Größen. Sie werden im folgenden immer in Angström-Einheiten (A.E.) ausgedrückt werden, welche, wie oben (S. 48) ausgeführt, gleich dem zehnmillionstel Teil eines Millimeters, also gleich 10^{-8} cm, ist.

Unter den Linien, die ein leuchtendes Gas zeigt, zeichnen sich immer einzelne durch besondere Helligkeit und Schärfe aus. Diese werden gewöhnlich als *die* Linien des betreffenden Elementes angesehen. Aber eine genaue Untersuchung mit einem leistungsfähigen Beugungsgitter (einem Gitter mit vielen Strichen, d. i. mit großer Dispersion) zeigt dann noch eine sehr große

Zahl anderer, schwächerer Linien, sie zeigt auch oft, daß einzelne Linien, die man zuvor für einfache Linien gehalten hat, aus zwei oder mehr sehr eng beieinanderstehenden Linien bestehen. Das Aussehen des Spektrums hängt auch wesentlich ab von der Temperatur des glühenden Dampfes oder von der Art, wie die Gase durch elektrische Anregung in Geißlerröhren zum Leuchten gebracht werden.

Das sichtbare Spektrum, das sich von Rot (mit der Grenzwellenlänge ungefähr 7600 A.E.) bis zu Violett (mit der Grenzwellenlänge ungefähr 3800 A.E.) erstreckt, hat aber bekanntlich zu beiden Seiten noch Fortsetzungen, die zwar für unser Auge direkt unerkennbar sind, die aber durch physikalische Hilfsmittel ebenso genau untersucht werden können, wie das sichtbare Spektrum. Die Fortsetzung jenseits des Roten nennt man das *Ultrarot*. Die Linien, die in diesem auftreten und die man durch ihre erwärmende Wirkung auf geeignete Apparate feststellen kann, haben also größere Wellenlänge als 7600 A.E. Man kann sie leicht bis 50000 A.E. verfolgen, aber durch genügend feine Apparate noch außerordentlich viel weiter, sogar bis zu $^1/_3$ mm, d. h. über 3 Millionen A.E.

Fig. 26.



Wasserstoffspektrum.

Den unsichtbaren Teil des Spektrums jenseits des violetten Endes, das *Ultraviolett*, in welchem bei den meisten Substanzen sehr viele Linien liegen, untersucht man leicht durch Photographie. Die ultravioletten Strahlen wirken nämlich noch weit hinaus auf die photographische Platte. Auf diese Weise kann man leicht bis zu einer Wellenlänge von 1800 A.E. herunter noch Linien finden und durch geeignete Apparate sogar noch bis zu der Wellenlänge von 1000 A.E.

Als ein Beispiel für die Linienspektra ist zunächst in Fig. 26 das Spektrum der Hauptlinien des Wasserstoffs gegeben, wie man sie beobachtet, wenn man eine mit Wasserstoff gefüllte *Geißler*sche Röhre (Spektralröhre) mit einem Spektroskop (Spalt und Prisma) beobachtet. Man sieht da gewöhnlich vier Linien, bei geeigneter Verdünnung des Gases noch die fünfte letzte Linie, und diese fünf Linien werden bezeichnet als Hα, Hβ, Hγ, Hδ, Hε und sie haben folgende Wellenlängen:

	Farbe	Wellenlänge in A.E.
Hα	rot	6563
Hβ	grün	4861
Hγ	dunkelblau	4341
Hδ	violett	4102
Hε	violett	3970

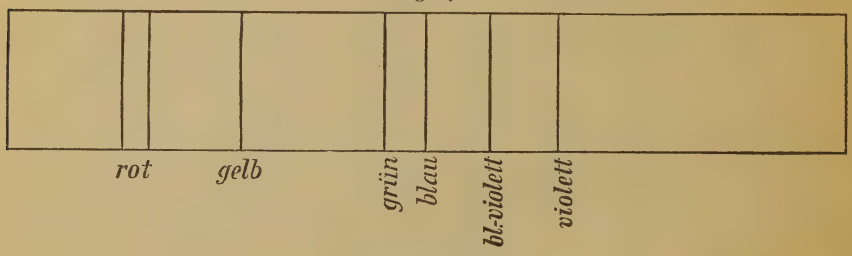
Ein zweites Beispiel bildet das Spektrum der Hauptlinien des Heliums in Fig. 27. Man sieht in diesem sieben helle Linien, welche folgende Farben und Wellenlängen besitzen:

Farbe	Wellenlänge in A.E.
rot	7065
rot	6678
gelb	5876
grün	5016
blau	4923
violett	4713
violett	4471

In derselben Weise zeigen nun die verschiedensten Elemente eine mehr oder minder große Anzahl von Linien in ihrem Spektrum. Verhältnismäßig einfach sind noch die Linienspektra der Alkalien, also der Gruppe Ia des periodischen Systems, wenig komplizierter die der Erdalkalien (Gruppe IIa des periodischen Systems), aber bei den weiteren Elementen sind die Spektra außerordentlich reich an Linien.

Da die Spektra für jedes chemische Element eine besondere Zusammensetzung haben, so hängen sie offenbar ab von den *Atomen*, und da jede Linie ja einer bestimmten Schwingungszahl entspricht, so zeigen sie an, daß innerhalb der Atome bestimmte periodische Bewegungen vor sich gehen. Schon aus dem Vorhandensein der Spektra konnte man also bereits lange schließen, und hat es auch getan, daß die Atome nicht einfach von Masse erfüllte Räume sind, sondern daß sie aus Teilen bestehen, welche periodische Bewegungen verschiedener Art ausführen können.

Fig. 27.



Heliumspektrum.

Wenn man sich zunächst von den bekannten Erscheinungen beim Schall als Analogie leiten lassen möchte, bei dem ja auch jeder Körper sehr verschiedene Schwingungen ausführen kann, so erkennt man doch bald, daß diese Analogie hier zu keinem Resultat führt. Wenn eine Luftsäule in einer Pfeife zum Schwingen gebracht wird, oder wenn eine gespannte Klaviersaite oder Violinsaite schwingt, so findet man zwar auch, daß die Luftsäule, die Saite, nicht bloß *eine* Schwingung von einer einzigen bestimmten Schwingungszahl ausführt, sondern daß sie gleichzeitig in verschiedenfache Schwingungen von sehr verschiedenartigen Schwingungszahlen gerät. Eine solche Luftsäule oder eine solche Saite gibt nicht einen *einfachen Ton*, sondern sie gibt einen *Klang*, worunter man in der Akustik eine Kombination verschiedener einfacher Töne versteht. Wenn man aber einen solchen Klang analysiert, die Einzeltöne aufsucht, aus denen der Klang sich zusammensetzt — und man kann das nach dem Vorgang von *Helmholtz* leicht machen —, so findet man folgendes. Unter allen diesen Tönen hat einer die kleinste

Schwingungszahl. Man nennt ihn den *Grundton* des Klanges. Er hat auch gewöhnlich die größte Stärke und bestimmt die musikalische Höhe des Klanges. Alle anderen Töne, die in dem Klang enthalten sind, haben nun immer Schwingungszahlen, die zu der Schwingungszahl des Grundtones in einem einfachen Verhältnis stehen. Bezeichnet man nämlich die Schwingungszahl des Grundtones als 1, so haben die anderen Töne des Klanges irgendwelche Schwingungszahlen der Reihe

$$2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 \ldots\ldots$$

Ihre Schwingungszahlen sind also *ganzzahlige* Vielfache der Schwingungszahl des Grundtones. Man bezeichnet diese Reihe von Tönen, die zu einem Grundton gehören, als seine *Obertöne*. Es können in einem Klang sämtliche Obertöne vorhanden sein — von verschiedener Stärke — oder es können bloß die geradzahligen, oder bloß die ungeradzahligen vorhanden sein, oder es können einige aus der Reihe hintereinander fehlen usf., kurz, die Kombination der Obertöne mit dem Grundton kann eine sehr verschiedene sein — darauf beruht die Verschiedenartigkeit der *Klangfarbe*, welche verschiedene Instrumente bei dem gleichen Grundton zeigen — aber, und darauf kommt es uns hier an, die Obertöne haben immer Schwingungszahlen, die ganz Vielfache des Grundtones sind. Daraus folgt, daß, von dem Grundton an gerechnet, in der ersten Oktave kein Oberton ist, in der zweiten Oktave sind zwei vorhanden (2, 3), in der dritten Oktave vier (4, 5, 6, 7), in der vierten acht (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15) usf. Die Differenz der Schwingungszahlen der aufeinanderfolgenden Obertöne in jeder Oktave ist immer die gleiche, nämlich 1, d. h. gleich der Schwingungszahl des Grundtones.

Wenn das bei den Schwingungen, die zu den Linienspektra Veranlassung geben, auch der Fall wäre, so müßten die einzelnen Linien eines Beugungsspektrums alle voneinander den gleichen Abstand haben, wobei allerdings auch einige in der Reihe fehlen könnten. Aber das ist durchaus nicht der Fall, die Analogie mit den Schallschwingungen führt bei der Untersuchung der Linienspektra zu keinem Resultat.

Eine Gesetzmäßigkeit in der Anordnung der Linien eines Spektrums wurde zum erstenmal beim *Wasserstoff* entdeckt, und zwar auf rein empirischem Wege, durch einfaches Probieren. Es war ein Schweizer, *Balmer*, welcher hier eine äußerst merkwürdige Regelmäßigkeit erkannte.

Die oben angeführten Wellenlängen der fünf Wasserstofflinien Hα bis Hε lassen sich nämlich durch folgende Zahlen darstellen:

Bezeichnung	Wellenlänge beobachtet	Darstellung durch	Wellenlänge berechnet
Hα	6563	$3646{,}13 \times \frac{9}{9-4}$	6563
Hβ	4861	$3646{,}13 \times \frac{16}{16-4}$	4861
Hγ	4341	$3646{,}13 \times \frac{25}{25-4}$	4341
Hδ	4102	$3646{,}13 \times \frac{36}{36-4}$	4102
Hε	3970	$3646{,}13 \times \frac{49}{49-4}$	3970

Der Faktor, mit dem die Zahl 3646,13 multipliziert werden muß, um die beobachteten Werte zu ergeben, hat also für die aufeinanderfolgenden Linien die Größen

$$\frac{3^2}{3^2-2^2},\ \frac{4^2}{4^2-2^2},\ \frac{5^2}{5^2-2^2},\ \frac{6^2}{6^2-2^2},\ \frac{7^2}{7^2-2^2}.$$

Dieses merkwürdige Gesetz zeigte sich nun nicht bloß bei den fünf in sichtbarem Spektrum vorhandenen Wasserstofflinien bestätigt. Vielmehr hat man noch im Ultravioletten eine Reihe weiterer Wasserstofflinien entdeckt, zum Teil direkt in Geißlerröhren, zum Teil in dem Spektrum der Protuberanzen. Und alle diese weiteren 24 Linien konnten durch dasselbe Gesetz dargestellt werden, indem der Reihe nach die Zähler die Werte 8^2, 9^2 ... bis 31^2, die Nenner die Werte 8^2-2^2, 9^2-2^2 usf. bis 31^2-2^2 erhielten. Wenn unter m eine der Zahlen von 3 bis 31 verstanden wird, so ist die Wellenlänge λ der zugehörigen Wasserstofflinie (in A.E.) bestimmt durch

$$\lambda = 3646{,}13 \cdot \frac{m^2}{m^2-2^2}.$$

Diese höchst überraschende Formel nennt man die *Balmersche Formel.* Die 29 Linien des Wasserstoffs, die durch diese Formel umfaßt werden, faßt man zusammen als eine *Serie* des Wasserstoffs.

Es ist vorteilhafter, statt der Wellenlängen dieser Linien vielmehr die *Schwingungszahlen* einzuführen, wobei ja das Produkt aus Wellenlänge und Schwingungszahl gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts, also gleich $3 \cdot 10^{10}$ cm/sek $= 3 \cdot 10^{18}$ A.E./sek ist.

Daher ist die Schwingungszahl $= \dfrac{3 \cdot 10^{18}}{\text{Wellenlänge}}$ und folglich ist für die m-te Linie des Wasserstoffs

$$\text{Schwingungszahl} = \frac{3 \cdot 10^{18}}{3646{,}13}\left(1 - \frac{2^2}{m^2}\right),$$

$$= \frac{3 \cdot 10^{18} \cdot 4}{3646{,}13}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

$$= 3{,}291 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Die Schwingungszahlen aller dieser 29 Linien sind also durch dieses Gesetz dargestellt, wenn man die Zahl m der Reihe nach alle ganzen Zahlen von 3 bis 31 durchlaufen läßt.

Von großem Interesse ist, daß im Ultrarot zwei Linien des Wasserstoffs gefunden wurden, deren Schwingungszahlen sich ganz ähnlich darstellen ließen durch die Formel

$$3{,}291 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2}\right) \text{ und } 3{,}291 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2}\right).$$

Die entsprechenden Wellenlängen wurden beobachtet zu

18 751 A.E. und 12 818 A.E.

und aus der obigen Formel berechnet zu

18 752 A.E. und 12 819 A.E.

Bei ihnen tritt also nicht die Differenz $\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}$ auf, sondern $\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2}$, sie gehören nicht zu der ursprünglichen *Balmer*schen Serie, aber sie bilden eine Serie mit einem ganz ähnlichen Gesetz.

Der Faktor $3{,}291 \cdot 10^{15}$, der hier zunächst nur beim Wasserstoffspektrum auftritt, hat, was zuerst von *Rydberg* erkannt wurde, eine allgemeine Bedeutung für alle Spektra. Man bezeichnet diesen Faktor als die *Rydbergsche Konstante* und drückt ihn kurz durch den Buchstaben R aus.

Die ausgezeichnete Übereinstimmung der *Balmer*schen Formel und der zuletzt erwähnten, entsprechend gebauten mit den im Wasserstoffspektrum direkt gefundenen Linien zeigt an, daß es sich hier nicht um einen Zufall, sondern um eine wirkliche Gesetzmäßigkeit handelt. Man kann die Schwingungszahlen ν der Wasserstofflinien (inklusive der ultraroten) darstellen durch die Formel

$$\text{Schwingungszahl} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

wo R die *Rydberg*sche Konstante $3{,}291 \cdot 10^{15}$ ist und wo für m der Reihe nach die ganzen Zahlen 3, 4, 5 usw. einzusetzen sind, während n für die gewöhnlichen Wasserstofflinien den Wert 2, für die ultraroten Wasserstofflinien den Wert 3 hat und dabei m erst von 4 an beginnt. Alle Linien, die sich für ein bestimmtes n ergeben, wenn man m die aufeinanderfolgenden ganzen Zahlen durchlaufen läßt, faßt man zusammen unter dem Begriff einer *Serie* und nennt sie *Serienlinien.*

Man hat natürlich bald versucht, das *Balmer*sche Gesetz auch auf andere Spektra als das des Wasserstoffs anzuwenden. Es zeigte sich aber, daß ein so einfaches Gesetz bei ihnen nicht existiert, ein so einfaches Gesetz, in dem bloß die Quadrate der aufeinanderfolgenden ganzen Zahlen vorkommen. Wohl aber zeigte sich, daß auch in diesen anderen Spektren eine ganze Anzahl von Linien zusammengehörten, daß sie auch dadurch zusammengefaßt werden können, daß man eine Zahl m alle ganzen Zahlen durchlaufen läßt, nur daß die Zahl m nicht wie bei *Balmer* im Quadrat, sondern in einer anderen Kombination vorkam. Alle solche zusammengehörigen Linien eines Spektrums faßt man unter dem Begriff einer Serie zusammen, und solche Serien haben sich bei vielen anderen Spektren ergeben, und es hat sich dabei gezeigt, daß alle Linien, die zu einer und derselben Serie gehören, auch gleiches Aussehen haben. Man unterscheidet im allgemeinen mehrere verschiedene Serien in den Spektren von sehr vielen Substanzen. Die Linien *einer* Serie sind durchweg scharf begrenzt (und bestehen häufig aus je zwei oder drei eng nebeneinanderliegenden Linien), die einer *anderen* Serie sind nach dem roten Ende hin verwaschen, die einer *dritten* Serie nach dem violetten Ende hin verwaschen usw.

Es ist also eine Gesetzmäßigkeit in den Spektren des Wasserstoffs und vieler anderer Elemente aufgefunden worden, aber eine Gesetzmäßigkeit besonderer Art. Die Schwingungszahlen der verschiedenen Linien hängen von der

aufeinanderfolgenden Reihe der ganzen Zahlen ab, aber sie sind nicht, wie die harmonischen Obertöne der Akustik, diesen ganzen Zahlen proportional, sondern sie enthalten diese ganzen Zahlen im Nenner, und zwar im einfachsten Fall im Quadrat und sonst in noch komplizierterer Kombination. Wie soll man sich nun einen schwingenden Mechanismus, also einen Mechanismus mit periodischen Bewegungen, vorstellen, bei dem ein so merkwürdiger und absonderlicher Zusammenhang zwischen den möglichen Schwingungen vorhanden ist? Könnte man einen solchen Mechanismus ersinnen, so würde er die inneren Bewegungen eines Atoms darstellen. Viele Versuche sind in dieser Richtung von Mathematikern und Physikern gemacht worden, aber im ganzen ohne Erfolg.

Eine Ausbildung der *Rutherfordschen Korntheorie der Atome* zu einer Theorie des ganzen Atoms erforderte also unbedingt, daß sie eine Darstellung gibt, durch welche Bewegungen im einfachsten Fall das *Balmer*sche Gesetz und in anderen Fällen das Gesetz der Serienspektra zustande kommt. Dem dänischen Forscher *Niels Bohr* ist es nun in den letzten Jahren gelungen, eine solche Ausbildung des *Rutherford*schen Atoms zu ersinnen, die Bewegungen der Elektronen um den Kern in solcher Weise vorzunehmen, daß sie die eben genannten Forderungen in einigen Fällen völlig erfüllt. Diese Theorie zeigt trotz vieler Schwierigkeiten und Dunkelheiten, die sie noch in sich enthält, doch so viele unerwartete glänzende Übereinstimmung mit den Tatsachen, daß man als sicher annehmen darf, daß sie einen großen Teil Wahrheit enthält.

Um diese Theorie zu verstehen, muß aber zunächst von einer in der Physik der letzten fünfzehn Jahre aufgetretenen, noch unverstandenen Tatsache gesprochen werden. Man kann bekanntlich bei allen Vorgängen physikalischer und chemischer Natur stets das Gesetz bewahrheiten, das zuerst von *Helmholtz* aufgestellt worden ist, daß bei ihnen *Energie* nicht geschaffen und nicht zerstört wird, sondern daß bei ihnen sich immer nur Energie aus einer Form in die andere verwandelt. Unter Energie versteht man alles, was aus Arbeit entsteht oder was in Arbeit verwandelt werden kann. Die Enerige kann sehr verschiedene Formen annehmen, sie kann kinetische Energie (lebendige Kraft), potentielle Energie, Wärmeenergie, elektrische Energie, chemische Energie, Lichtenergie sein, alles physikalische und chemische Geschehen ist immer mit einer Umwandlung der Energie aus einer Form in eine andere Form verbunden. Dabei stellen wir uns die Energie als etwas vor, das sich *stetig* ändern kann, das also um die kleinsten Beträge zunehmen oder abnehmen kann. Bei allen Energieverwandlungen, mit denen wir es gewöhnlich zu tun haben, findet eine solche stetige Umwandlung der Energie statt. Wenn z. B. fließendes Wasser eine Turbine treibt und diese Turbine eine Dynamomaschine in Bewegung setzt, von welcher ein elektrischer Strom geliefert wird, der die Glühlampen eines Ortes speist, so setzt sich die kinetische Energie des Wassers um in die Arbeit, die sie an der Turbine leistet; diese Arbeit setzt sich dann in Bewegungsenergie der Turbine und Dynamomaschine um, diese verwandelt sich endlich in die Energie elektrischer Ströme und diese endlich in Wärmeenergie und Lichtenergie. Eine noch so kleine Menge des fließenden Wassers, eine noch so kleine Arbeit, die dieses leistet, setzt sich schließlich in einen entsprechenden Betrag von Wärme- und Lichtenergie um. Wir drücken das so

aus, daß wir sagen, die Energie kann sich *stetig* verändern, es gibt keine sprungweise Änderung der Energie des fließenden Wassers, ebensowenig wie der Energie der elektrischen Ströme und des Lichtes.

Diese Vorstellung und Aussage aber war bloß solange richtig, als wir es mit den groben Erscheinungen zu tun hatten, die die Körper im ganzen uns zeigen. Seitdem in den letzten Jahrzehnten die Physik soweit vorgedrungen ist, daß sie das Verhalten der einzelnen Atome und Elektronen studieren konnte, zeigte es sich, daß diese Vorstellung nicht mehr richtig ist. Die Energie, welche von den einzelnen Atomen in Form von Schwingungen ausgegeben wird, verhält sich nicht stetig, nicht gleichmäßig, sondern sie verändert sich direkt *sprungweise* oder, wie man es jetzt nennt, *quantenhaft*. Ein Atom kann einen gewissen kleinsten Betrag von Energie als schwingende, strahlende Energie ausgeben, *ein Energiequantum*, oder zwei oder drei usw. solcher Energiequanten, aber es kann nicht $^3/_4$ oder $1^1/_2$ oder $2^1/_4$ Energiequanten oder überhaupt irgendeinen Zwischenbetrag zwischen 1 und 2 solcher Quanten ausgeben. Diese Einsicht hat die Physik zuerst durch die Untersuchung der Ausstrahlung eines schwarzen Körpers gewonnen, und sie hat sich dann auch in anderen Fällen als berechtigt gezeigt, wo die Schwingungen, die periodischen Bewegungen von Atomen in Frage kommen, insbesondere bei der Theorie der spezifischen Wärme. Diese Energiequanten sind aber nicht für jede Art von Schwingung gleich groß, vielmehr sind sie um so größer, je größer die Schwingungszahl ist. Das Verhältnis zwischen der Größe eines solchen Energiequantums eines schwingenden Atoms und der Schwingungszahl desselben ist eine konstante Größe, die eine ganz besonders wichtige Rolle in der Untersuchung der Atomvorgänge noch spielen wird, und die man die *Plancksche Konstante* oder das *Wirkungsquantum* nennt. Dieses Wirkungsquantum hat im absoluten Maß (cm, g, sec) den Wert $6{,}55 \cdot 10^{-27}$. Daraus ergibt sich, daß das Energiequantum (Wirkungsquantum mal Schwingungszahl) für periodische Bewegungen verschiedener Art Werte besitzt, die in folgender Tabelle angegeben sind:

Art der Schwingung	Rot	Violett	Äußerstes Ultraviolett	Röntgenstrahlen
Wellenlänge . . .	$7600 \cdot 10^{-8}$	$3800 \cdot 10^{-8}$	$1000 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$ cm
Schwingungszahl .	$0{,}04 \cdot 10^{16}$	$0{,}08 \cdot 10^{16}$	$0{,}3 \cdot 10^{16}$	$300 \cdot 10^{16}$
Energiequantum .	$0{,}26 \cdot 10^{-11}$	$0{,}52 \cdot 10^{-11}$	$1{,}95 \cdot 10^{-11}$	$1950 \cdot 10^{-11}$ Erg.

Eine bestimmte Vorstellung, was dieses Wirkungsquantum bedeutet, oder was die spezielle Ursache ist, daß die Atome schwingende Energie nur in einzelnen Quanten ausgeben (und vielleicht auch aufnehmen), besitzen wir heute noch nicht. Das Auftreten dieser Quanten bei atomistischen Schwingungsvorgängen ist eine aus experimentellen Beobachtungen erschlossene Tatsache, mit der man stets bei solchen Vorgängen rechnen muß, aber ihre anschauliche nähere Erklärung fehlt uns noch.

In der Atomtheorie von *Bohr* spielen daher auch diese Energiequanten eine wichtige Rolle, diese Theorie ist ein weiterer Ausbau der *Rutherfordschen* Korntheorie mit Zuhilfenahme des Wirkungsquantums. Ein Atom entspricht

nämlich nach der *Bohr*schen Theorie einem ganzen Sonnensystem. Jedes Atom besitzt einen positiv elektrischen *Kern* von sehr kleinen Dimensionen, einen Kern, der soviel freie positive Elementarladungen besitzt, als die Ordnungszahl des betreffenden Elementes beträgt. Um diesen positiven Kern nun bewegen sich die *negativen Elektronen* in Kreisen (oder allgemeiner in Ellipsen) ganz ebenso, wie sich die Planeten um die Sonne bewegen. Die Kraft, die jedes Elektron zwingt, auf dem Kreise zu bleiben, die *Zentripetalkraft*, ist die einfache *Coulomb*sche Anziehungskraft zwischen der positiven Ladung des Kerns und der negativen Ladung des Elektrons. Bei Anwesenheit noch anderer negativer Elektronen, als der des gerade betrachteten, ist diese Anziehungskraft noch vermindert durch die Abstoßungskräfte der übrigen vorhandenen negativen Elektronen. Unter dem Einfluß dieser Anziehungskraft und einer ursprünglichen Geschwindigkeit (die das Elektron etwa durch einen Stoß von anderen Elektronen erhalten hat) bleibt das Elektron auf seinem Kreise (oder seiner Ellipse), so wie der Mond auf seinem Kreise um die Erde oder die Erde auf einer Ellipse um die Sonne bleibt. Die Zentri*fugalkraft* des bewegten Elektrons ist immer gleich der Zentripetalkraft, die der Kern (und etwaige andere Elektronen) auf dasselbe ausübt.

Während aber die Planeten, die um die Sonne kreisen, ganz verschiedene Abstände von der Sonne haben und in ihrer Bahn ganz verschiedene Geschwindigkeiten besitzen, wobei die Abstände ganz beliebig sind und keinem Gesetz unterliegen, ist das bei den Elektronen, die um den Kern kreisen, nicht der Fall, und zwar wegen des Wirkungsquantums. *Vielmehr können sie nur in ganz bestimmten Abständen, die durch ganze Zahlen charakterisiert sind, in Kreisbewegungen um den Kern begriffen sein, und ihre Geschwindigkeiten müssen in diesen Bahnen ganz bestimmte sein.*

Nehmen wir den einfachsten Fall, den des Wasserstoffatoms, bei dem nur ein positiver Kern mit der Einheit der Ladung und nur ein negatives Elektron mit derselben (negativen) Ladung vorhanden ist. Wenn das Elektron sich auf einem Kreis von unbekanntem Radius mit unbekannter Geschwindigkeit bewegt, so bestehen zwischen diesen beiden unbekannten Größen, dem Radius und der Geschwindigkeit, zwei Gleichungen. Erstens nämlich muß die *Coulomb*sche Attraktionskraft gleich der Zentrifugalkraft sein und zweitens muß die lebendige Kraft des Elektrons gleich einem ganzzahligen Vielfachen des Wirkungsquantums (der *Planck*schen Konstanten) sein, dividiert durch die Zeit eines doppelten Umlaufs. Aus der ersten Beziehung ergibt sich, daß das Quadrat der Geschwindigkeit, welches ein Elektron auf einer möglichen Bahn von einem bestimmten Radius hat, gleich ist dem Quadrat der Elementarladung, welche sowohl der Kern als das Elektron besitzt, dividiert durch die Masse des Elektrons, und durch den Radius des Kreises, auf dem es sich bewegt. Und aus der zweiten Beziehung folgt, daß die Geschwindigkeit des Elektrons auf diesem Kreise gleich diesem ganzzahligen Vielfachen des *Planck*schen Wirkungsquantums dividiert durch die Masse des Elektrons und durch den Radius des Kreises ist (noch multipliziert mit 2π). Aus diesen beiden Beziehungen läßt sich also sowohl der Radius der Bahn wie die Geschwindigkeit ermitteln, wenn gegeben sind die beiden Ladungen (des Kerns und des Elektrons), die Masse des Elektrons und die *Planck*sche Konstante. Je nach dem ganzzahligen

Vielfachen des Wirkungsquantums bewegt sich ein Elektron, wie man sagt, auf einer *einquantigen Bahn*, oder einer *zweiquantigen, dreiquantigen* usw.

Was zunächst den Radius der ersten (einquantigen) Bahn betrifft, so ergibt er sich aus den angegebenen Werten folgendermaßen:

$$\text{Radius der 1. Bahn} = \frac{\text{Quadrat des Wirkungsquantums}}{\text{Masse d. Elektrons} \times \text{Quadrat d. Elementarladung}} \times \frac{1}{4\pi^2}.$$

Die Radien aller aufeinanderfolgenden möglichen Kreisbahnen (wenn wir der Einfachheit halber von den elliptischen Bahnen absehen und nur Kreisbahnen ins Auge fassen) müssen sich wegen des Wirkungsquantums zueinander verhalten, wie die Quadrate der aufeinanderfolgenden ganzen Zahlen, also wie $1 : 4 : 9 : 16 : 25 : 36$ usw. Trägt man für das Wirkungsquantum, die Masse des Elektrons und das Quadrat des Elementarquantums ihre Werte aus S. 71, 27 und 20 ein, so zeigt sich, daß beim Wasserstoff der innerste Kreis, die einquantige Bahn, den Radius besitzt $0{,}55 \cdot 10^{-8}$ cm, der zweite also $2{,}20 \cdot 10^{-8}$ cm, der dritte $4{,}95 \cdot 10^{-8}$ cm, der vierte $8{,}80 \cdot 10^{-8}$ usw., Radien, deren erste Werte vergleichbar sind mit dem Radius des Wasserstoffatoms ($1 \cdot 10^{-8}$ nach S. 9).

Die Geschwindigkeit, die das Elektron auf der ersten Bahn besitzt, ergibt sich ebenso aus den obigen Gleichungen. Es wird die

$$\text{Geschwindigkeit auf der 1. Bahn} = \frac{\text{Quadrat der Elementarladung}}{\text{Wirkungsquantum}} \times 2\pi.$$

Diese Geschwindigkeit beträgt $2{,}172 \cdot 10^8$ cm/sec, also etwa $^1/_{150}$ der Lichtgeschwindigkeit. Auf den folgenden Bahnen ist die Geschwindigkeit kleiner; je weiter die Bahn vom Kern absteht, um so langsamer bewegt sich das Elektron, und zwar verhalten sich die Geschwindigkeiten auf diesen Bahnen zueinander wie $1 : {}^1/_2 : {}^1/_3 : {}^1/_4 : {}^1/_5$ usw.

Um ein Elektron von dem Kern ganz loszulösen, es also in unendlich große Entfernung von dem Kern zu bringen, muß man, da ja Kern und Elektron sich anziehen, *Arbeit aufwenden*, also dem System zuführen, und zwar ist die dazu notwendige Arbeit um so größer, je näher das Elektron am Kerne ist, je kleiner also der Radius der Bahn ist. Diese Arbeit ist nämlich immer gleich der lebendigen Kraft des Elektrons, d. h. gleich dem Produkt aus der halben Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit des Elektrons. Wir wollen die Arbeit, welche nötig ist, um das Elektron *aus dem ersten Kreis* in unendliche Entfernung zu bringen, als die *Loslösungsarbeit* des Elektrons bezeichnen. Aus den oben angegebenen Werten für die Geschwindigkeit auf dem ersten Kreis, ergibt sich daher sofort

$$\text{Loslösungsarbeit} = \frac{\text{Masse des Elektrons} \times \text{4. Potenz der Elementarladung}}{\text{Quadrat des Wirkungsquantums}} \times 2\pi^2.$$

Tragen wir die Werte ein: Masse des Elektrons gleich $8{,}9 \cdot 10^{-28}$ (S. 27), Elementarladung gleich $4{,}74 \cdot 10^{-10}$ (S. 20), Wirkungsquantum $6{,}55 \cdot 10^{-27}$ (S. 71), so berechnet sich die Loslösungsarbeit für das Wasserstoffelektron zu $21{,}15 \cdot 10^{-12}$ Erg.

Da die Geschwindigkeiten auf den folgenden Bahnen im Verhältnis von $1 : {}^1/_2 : {}^1/_3 : {}^1/_4$ usw. abnehmen, so ist die Arbeit, um ein Elektron aus einer der

folgenden Bahnen in die Unendlichkeit zu bringen, kleiner als die Loslösungsarbeit, und zwar im Verhältnis

$$\frac{1}{1^2} : \frac{1}{2^2} : \frac{1}{3^2} : \frac{1}{4^2} \text{ usw.}$$

Wir stellen uns nun vor, daß wir einen Kubikzentimeter Wasserstoff haben; in diesem sind Trillionen von Kernen und Trillionen von Elektronen vorhanden. Von den Kernen und den Elektronen wollen wir annehmen, daß sie in unregelmäßiger Wärmebewegung begriffen sind. Dann wird irgendein Elektron durch einen Stoß, den es erhält, hier und da einmal in eine von den möglichen Bahnen in der Nähe eines Kerns kommen und wird in dieser Bahn rotieren. Durch einen anderen Stoß wird es einmal aus dieser Bahn herausgeschleudert werden und in kleineren oder größeren Abstand von dem Kern kommen und wird dann also eine Kreisbahn von kleinerem oder größerem Abstand beschreiben. Wenn es nun dabei von einer *entfernteren* Bahn zu einer *näheren* Bahn kommt, so muß es dabei Energie *abgeben*. Wenn z. B. ein Elektron aus dem dritten Kreis in den zweiten übergeht, so gibt es dabei eine Energie ab, welche gleich ist

$$\text{Loslösungsarbeit} \times \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right)$$

und wenn es aus dem vierten Kreis in den zweiten übergeht, so ist die dabei abgegebene Energie

$$\text{Loslösungsarbeit} \times \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right)$$

Diese jedesmal abgegebene Energie aber kann nach der Quantentheorie nur ein Energieelement sein, und jedem abgegebenen Energieelement entspricht, je nach seiner Größe, eine bestimmte Schwingungszahl *und diese Schwingungszahl bestimmt die Farbe des bei diesem Vorgang ausgestrahlten Lichts*. Da nach S. 71 die Schwingungszahl gleich dem Energieelement dividiert durch das Wirkungsquantum ist, so sieht man, daß wenn ein solches Elektron aus dem dritten Kreis auf den zweiten übergeht, daß dann die ausgestrahlte Schwingungszahl gleich sein muß

$$\frac{\text{Loslösungsarbeit}}{\text{Wirkungsquantum}} \times \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right)$$

und wenn es aus dem vierten Kreis in den zweiten gestoßen wird, so ist sie gleich

$$\frac{\text{Loslösungsarbeit}}{\text{Wirkungsquantum}} \times \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right).$$

Es treten also gerade diejenigen Faktoren auf, die in der *Balmerschen Formel* für den Wasserstoff vorkommen. Ja noch mehr. Nicht bloß die *Balmer*schen Faktoren treten hier auf, sondern der Faktor, die Loslösungsarbeit dividiert durch das Wirkungsquantum erweist sich bei Durchführung der Rechnung *genau gleich der Rydbergschen Konstante* R. Aus der Loslösungsarbeit $1{,}15 \cdot 10^{-12}$ Erg. und dem Wirkungsquantum $6{,}55 \cdot 10^{-27}$ ergibt sich nämlich

$$\frac{\text{Loslösungsarbeit}}{\text{Wirkungsquantum}} = \frac{21{,}15}{6{,}55} \cdot 10^{15} = 3{,}230 \cdot 10^{15}.$$

Dies stimmt mit dem experimentell bestimmten Wert der *Rydberg*schen Konstante $R = 3{,}290 \cdot 10^{15}$ sehr gut überein. Wenn also ein Elektron aus dem m-ten Kreis auf den zweiten fliegt, so entsteht eine Schwingung, deren Schwingungszahl ν gleich ist

$$\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

genau diejenige Schwingungszahl, die der Balmerschen Serienformel für den Wasserstoff entspricht.

Das ist offenbar eine ganz hervorragende Leistung, die dieser ganzen Vorstellung erst nachträglich die Berechtigung gibt.

Die *Rydbergsche Konstante* ist also gleich

$$\frac{\text{Loslösungsarbeit}}{\text{Wirkungsquantum}}$$

und sie ergibt sich aus dem S. 72 angeführten Wert für die Loslösungsarbeit gleich

$$\frac{\text{Masse eines Elektrons} \times \text{vierte Potenz der Elementarladung}}{\text{dritte Potenz des Wirkungsquantums}} \times 2\pi^2.$$

Unter den Trillionen von Kernen und Elektronen, die in einem Kubikzentimeter Wasserstoff vorhanden sind, werden alle möglichen Fälle der Bewegung sehr oft vorkommen. Es werden viele tausend Male Elektronen von der dritten Bahn nach der zweiten gestoßen werden, andere Tausende werden von der vierten oder fünften Bahn nach der zweiten gestoßen werden. Das Resultat des gleichzeitigen oder aufeinanderfolgenden Zutreffens solcher Bewegungen sehen wir als die Spektrallinien, die der Wasserstoff ausstrahlt.

Man muß dabei zunächst aber fragen, warum werden diese Elektronen *nur nach der zweiten* Bahn geworfen, warum ist diese Bahn bevorzugt? Warum sieht man nicht auch die Spektrallinien, die entstehen, wenn ein Elektron von dem dritten oder vierten Kreis nach dem ersten geworfen wird, oder wenn es von dem vierten oder fünften Kreis nach dem dritten geworfen wird? Die Antwort darauf lautet einfach, daß natürlich solche Fälle auch ebenso oft vorkommen müssen, wie ein Übergang zur zweiten Bahn, daß aber die so entstehenden Spektrallinien *nicht in das sichtbare Gebiet fallen würden*, das ja nur von 7600 bis 3800 A.E. reicht.

In der Tat hat ja die *Rydberg*sche Konstante den Wert $3{,}290 \cdot 10^{15}$, und die Differenzen, die bei dem Übergang aus einer entfernteren Bahn in die *erste* auftreten würden, sind

$$\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}, \quad \frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2}, \quad \frac{1}{1^2} - \frac{1}{4^2}, \quad \frac{1}{1^2} - \frac{1}{5^2}.$$

Sie haben also die Werte

$$\frac{3}{4}, \frac{8}{9}, \frac{15}{16}, \frac{24}{25}.$$

Die zu ihnen gehörigen Schwingungszahlen sind also

$2{,}4675 \cdot 10^{15}$ $2{,}9244 \cdot 10^{15}$ $3{,}0844 \cdot 10^{15}$ $3{,}1584 \cdot 10^{15}$.

Die zugehörigen Wellenlängen sind

1216 A.E. 1026 A.E. 973 A.E. 950 A.E.

Diese Wellen fallen also in das *äußerste ultraviolette Gebiet*, das sehr schwer zu beobachten ist, schon deswegen, weil diese kurzwelligen Strahlen schon von der Luft sehr stark absorbiert werden. Sie scheinen von *Lyman* beobachtet worden zu sein.

Anderseits haben die Differenzen, die beim Übergang aus einer entfernteren Bahn in die *dritte* auftreten würden, nämlich

$$\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2}, \quad \frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2}, \quad \frac{1}{3^2} - \frac{1}{6^2}, \quad \frac{1}{3^2} - \frac{1}{7^2},$$

die Werte

$$\frac{7}{144} \qquad \frac{16}{225} \qquad \frac{1}{12} \qquad \frac{40}{441}.$$

Die zu ihnen gehörigen Schwingungszahlen sind also

$$0{,}15998 \cdot 10^{15} \qquad 0{,}23403 \cdot 10^{15} \qquad 0{,}2742 \cdot 10^{15} \qquad 0{,}2984 \cdot 10^{15}.$$

Die zugehörigen Wellenlängen sind

18 752 A.E. 12 819 A.E. 10 941 A.E. 10 053 A.E.

Diese fallen also in das *Ultrarot*, sind also nur durch besondere Hilfsmittel erkennbar. Die ersten beiden Linien dieser Reihe sind, wie unten S. 68 angeführt, in der Tat beobachtet worden.

Die Differenz $\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2}$ und die entsprechenden für den Übergang bis zum *vierten* Kreis geben noch viel weiter im Ultrarot liegende Linien. Die erste hätte eine Wellenlänge von 40 527 A.E. Im sichtbaren Spektrum liegen also bloß diejenigen Linien, die bei einem Übergang aus einem entfernteren Kreis auf den *zweiten* entstehen. Und solche Übergänge sind nach der *Balmer*schen Formel und ihren Bestätigungen sogar für den einunddreißigsten Kreis noch zu beobachten. Dabei ist aber ganz allgemein zu bemerken, daß die Bewegung von Elektronen in den weiteren Abständen vom Kern, also etwa in dem zehnten, fünfzehnten Kreis nur unter besonderen Bedingungen vorkommen kann. Diese Abstände sind schon so groß, daß sie bei der gewöhnlichen Dichtigkeit der Gase, wie sie in den Geißlerröhren vorhanden ist, größer sind, wie der durchschnittliche Abstand zweier Kerne. In der Tat hat der fünfzehnte Kreis nach S. 73 einen *Durchmesser* von $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ cm. Bei normalem Druck ist aber der mittlere Abstand zweier Atome nach S. 10 etwa $3{,}3 \cdot 10^{-7}$ cm. Bei der Verdünnung bis auf 1—2 mm Druck, wie er in den Spektralröhren herrscht, wird der Abstand also etwa $\sqrt[3]{760}$mal so groß sein, d. h. $2{,}7 \cdot 10^{-6}$ cm, mithin von derselben Größe wie der fünfzehnte oder sechzehnte Kreis. Ein Elektron, das in größerem Abstand von einem Kern sich befindet, wird daher nicht um diesen, sondern um den benachbarten Kern seine Kreisbewegung ausführen. Daraus ist zu folgern, daß man in Geißlerröhren das ultraviolette Spektrum des Wasserstoffs nur bis zur zwölften Linie der *Balmer*schen Serie verfolgen kann, und das ist tatsächlich der Fall. Die weiteren Linien bis Nr. 31 hat man tatsächlich nicht in Geißlerröhren, sondern bloß in dem

Spektrum der *Himmelsnebel* beobachtet, bei denen die Dichtigkeit des Gases als äußerst gering anzusehen ist, während doch zugleich infolge ihrer großen Ausdehnung die Intensität der Linien groß wird. Das entspricht genau demjenigen, was aus der *Bohr*schen Vorstellung zu erwarten ist.

Bei normalem Druck hat ein Wasserstoffmolekül einen Raum für sich, dessen halbe Seitenlänge $16{,}5 \cdot 10^{-8}$ cm ist. In diesen Raum würden aber nur die Kreise 1 bis 5, deren letzter einen Radius von $13{,}7 \cdot 10^{-8}$ cm besitzt, hineingehen. Der fünfte Kreis entspricht der Wasserstofflinie $H\gamma$. Man muß also erwarten, daß Wasserstoff bei normalem Druck nur die Linien $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ zeigt.

Um für die Größenverhältnisse, die bei dem so gestalteten Wasserstoffatom vorhanden sind, eine Anschauung zu bekommen, denken wir uns wieder das Wasserstoffatom vom Radius $1 \cdot 10^{-8}$ cm vergrößert, bis es den Raum der ganzen Erde einnimmt, also einen Radius von 6350 km besitzt. Dann hat der Kern einen Radius von 6 cm, entspricht also der Größe eines Kinderballs. Das Elektron hat einen Radius von 120 m, entspricht also der Größe einer Kirche oder Kaserne. Diese Kaserne rotiert also um den Kinderball, und zwar ist der kleinste Abstand, den das Elektron von dem Kern besitzt (auf dem Kreise 1), $0{,}55 \cdot 10^{-8}$ cm, entspricht etwa dem halben Erdradius, also einem Abstand von 3500 km. Die weiteren Kreise haben den doppelten, viereinhalbfachen Erdradius. Man sieht, daß *in dem ganzen Atom nur sehr wenig Raum wirklich von* (elektrischer) *Materie eingenommen ist, daß der größte Teil des Atomes leer ist.*

Anderseits aber erkennt man, daß ein Atom überhaupt kein bestimmtes Volumen besitzt, sondern daß sein Volumen sehr verschieden ist, je nach der Verdünnung des Gases. In den sehr dünnen Himmelsnebeln hat ein Atom einen Radius, der etwa 1000mal so groß ist, wie der Abstand des innersten Ringes. Denn noch in diesem Abstand wirkt dort der Kern auf das Elektron.

Im stabilsten Fall zirkuliert das Elektron auf dem Kreise 1, auf dem dem Kern am meisten benachbarten Kreise. In diesem Falle wäre der Radius des Atoms nur etwa die Hälfte desjenigen, der sich aus der Gastheorie für das Molekül berechnet.

So einfach wie das Wasserstoffatom ist natürlich kein anderes gebaut. Das nächst einfache ist das *Heliumatom*, dessen Kern zwei positive Ladungen besitzt, und das deshalb auch zwei äußere Elektronen enthalten muß. Hier sind nun schon für die Anordnung der Elektronen mehrere Möglichkeiten vorhanden. Es könnte jedes dieser Elektronen auf einer besonderen Bahn rotieren, oder sie könnten beide auf derselben Bahn — aus Symmetriegründen im Abstand eines Halbkreises — rotieren. Wir werden diese Möglichkeiten im folgenden Kapitel besprechen. Die Schwingungszahlen, welche sich durch die Bewegung *eines* dieser Elektronen aus einem äußeren Kreis in einen inneren Kreis ergeben, besitzen genau dasselbe Gesetz wie die *Balmer*schen Wasserstoffschwingungen, nur daß, weil der Kern hier zwei Einheiten besitzt, nicht die ganzen Zahlen selbst im Nenner als Quadrat vorkommen, sondern ihre Hälften. Es ist auch tatsächlich eine Serie von Heliumlinien beobachtet worden, die diesem Gesetz entspricht. Zu ihr aber gehören *nicht* die oben S. 66 angeführten Hauptlinien des Heliums. Die *Rydbergsche Konstante* tritt auch beim Helium auf. Eine vollkommene Durchführung aber aller möglichen Schwingungen, wie beim Wasserstoffatom, ist beim Heliumatom noch nicht

möglich gewesen. Insbesondere ist, wie gesagt, das Auftreten der Hauptlinien im sichtbaren Spektrum noch nicht erklärt.

Für alle weiteren Spektra, namentlich die der Alkalien und der Erden, hat man nun rein empirisch auch Serien und zwar Serien verschiedener Art gefunden, die alle durch das Fortschreiten einer Größe nach ganzen Zahlen charakterisiert sind. Bei allen diesen Serien hat sich die *Rydbergsche Konstante*, wenigstens in großer Annäherung, immer wieder bei der Berechnung der experimentellen Ergebnisse ergeben. Sie ist also eine fundamentale Konstante, welche bei allen Serienschwingungen auftritt. Auch nach der *Bohr*schen Theorie muß in vielen Fällen immer wieder die *Rydbergsche Konstante* auftreten. Denn wenn auch der Kern aus vielen Einheiten zusammengesetzt ist und wenn ebensoviele Elektronen um den Kern herumfliegen, so muß doch im großen Abstand vom Kern, wo die Kräfte auf ein Elektron im wesentlichen auch von *einer* Elementarladung herrühren (nämlich der Ladung des Kerns, abzüglich der Ladung aller übrigen Elektronen), das Verhalten ganz dasselbe sein, wie bei der Bindung des Wasserstoffelektrons durch den Wasserstoffkern, d. h. es muß dabei auch die *Rydbergsche Konstante* auftreten.

Es hat sich übrigens bei der empirischen Berechnung der Serienlinien in solchen Fällen gezeigt, daß die auftretende Konstante zwar immer sehr nahe gleich der *Rydbergschen Konstante* für Wasserstoff ist, daß aber doch kleine Abweichungen von dieser sicher existieren. Aber auch diese Tatsache kann die *Bohr*sche Theorie ohne weiteres erklären. Wenn ein Elektron von einem Kern angezogen wird und sich in einem Kreise bewegt, so ist der Mittelpunkt dieses Kreises streng genommen nicht der (punktförmige) Kern, sondern er ist, da ja auch der Kern angezogen wird, der Schwerpunkt der beiden Massen, des Kerns und des Elektrons. Je nach dem Verhältnis dieser beiden Massen, welches immer sehr klein ist, muß daher die Konstante der Serienlinien für solche Atome kleine Abweichungen von der *Rydberg*schen Zahl für den Wasserstoff zeigen.

Eine genaue Durchführung der *Bohr*schen Atomtheorie für diese komplizierten Fälle begegnet noch erheblichen Schwierigkeiten. Sie muß damit rechnen, daß in den kleinen Abständen vom Kern, die hier in Frage kommen, das *Coulomb*sche Anziehungsgesetz vielleicht nicht genau so gilt, als ob der Kern ein Punkt wäre, daß vielmehr die Form des Kernes dabei eine Rolle spielt. Wenn z. B. der Kern die Form einer flachen Scheibe statt einer Kugel hätte, so würden in den kleinen Entfernungen ganz andere Anziehungsgesetze geltend sein. Hier ist für eine Weiterbildung der Theorie, die sich nicht darauf beschränkt, bloß rechnerische Resultate zu erzielen, sondern die physikalische Tatsachen zu ergründen sucht, noch ein fruchtbares aber schwieriges Gebiet offen.

Durch eine Erweiterung der *Bohr*schen Theorie gelang es *Sommerfeld*, auch die vielen feinen Linien, die sich bei großer Dispersion im Wasserstoff- und im Heliumspektrum zeigen, die sogenannte *Feinstruktur* dieser Spektren, zu erklären.

Wenn der Übergang eines Elektrons aus einem entfernteren Kreis zu einem näheren mit der *Emission* einer Strahlung verbunden ist, so ist umgekehrt die *Absorption* von Strahlung mit dem Übergang eines Elektrons von einem inneren zu einem äußeren Kreis verbunden.

Der Übergang eines Elektrons aus der innersten Bahn in unendliche Entfernung erfordert einen Aufwand von Arbeit, also eine Zufuhr von Energie, die wir oben S. 73 als *Loslösungsarbeit* bezeichnet und für das Wasserstoffatom berechnet haben. Nun ist eine solche Entfernung eines Elektrons von dem Kern, eine solche Loslösung desselben nichts anderes, als dasjenige, was man als *Ionisierung* des Atoms bezeichnet. Aus dem neutralen Wasserstoffatom, Kern + negatives Elektron, bildet sich dabei ein Wasserstoffion, welches eben der Kern ist. Das Elektron ist von dem Kern ganz losgelöst. Solche Ionisierung von Atomen nun wird in Wirklichkeit immer erzeugt, wenn man rasch bewegte Elektronen oder Ionen auf Atome stoßen läßt, was man als *Stoßionisation* bezeichnet, oder auch wenn man Röntgenstrahlen oder Gammastrahlen auf die Atome treffen läßt oder auch noch auf andere Weise. Bei der Stoßionisation durch bewegte Elektronen muß offenbar das stoßende Elektron, um ionisieren zu können, eine solche lebendige Kraft besitzen, daß es die Loslösungsarbeit an dem gestoßenen Atom leisten kann. Diese lebendige Kraft aber erhält das stoßende Elektron bei den wirklichen Verhältnissen immer dadurch, daß es unter dem Einfluß einer Spannungsdifferenz immer mehr beschleunigt wird, bis es die entsprechende Geschwindigkeit erreicht hat. Die Spannungsdifferenz, unter deren Wirkung das stoßende Elektron steht, leistet an ihm eine so große Arbeit, daß die erzeugte lebendige Kraft wieder ausreicht, um die Loslösungsarbeit an dem gestoßenen Elektron zu leisten. Man bezeichnet diese Spannung als die *Ionisierungsspannung*. Das heißt aber: die Arbeit der Ionisierungsspannung an dem stoßenden Elektron muß gleich der Loslösungsarbeit des gestoßenen Elektrons sein. Nun ist die Arbeit einer elektrischen Spannung (in Volt gemessen), wenn sie eine Anzahl von Coulomb bewegt, gleich dem Produkt aus den Volt und den Coulomb, und diese Arbeit ist dann in 10^7 Erg. ausgedrückt. Die bewegte Anzahl Coulomb ist hier die Elementarladung des stoßenden Elektrons (also $1{,}58 \cdot 10^{-19}$ Coulomb nach S. 20). Daraus folgt:

$$\text{Ionisierungsspannung} \times 1{,}58 \cdot 10^{-19}\ \text{Coulomb} \times 10^7 = \text{Loslösungsarbeit (in Erg.)}.$$

Für die Ionisierungsspannung des Wasserstoffatoms ergibt sich daraus (nach S. 73):

$$\text{Ionisierungsspannung} = \frac{21{,}15 \cdot 10^{-12}}{1{,}58 \cdot 10^{-12}} = 13{,}3\ \text{Volt}$$

Diese Zahl ist etwas größer als diejenige, die man experimentell für die Ionisierungsspannung des Wasserstoffs gefunden hat, nämlich 11 Volt. Der Unterschied kommt vermutlich daher, daß man bei den experimentellen Messungen nicht sicher ist, ob das abgetrennte Ion wirklich vollkommen von dem Kern getrennt ist oder nur in größere Entfernung von ihm gelangt ist. Im letzten Falle muß die Ionisierungsspannung entsprechend kleiner sein als 13,3 Volt. Jedenfalls zeigt das *Bohr*sche Atom auch in dieser Hinsicht nahe Übereinstimmung mit der Wirklichkeit, und das gilt nicht bloß für das Wasserstoffatom, sondern auch für andere Atome, wie durch die Messungen von *Franck* und *Hertz* und anderen bewiesen ist.

Bei einer Fortführung der *Bohr*schen Theorie von den einfachsten Fällen des Wasserstoffs und des Heliums mit ein oder zwei Elektronen zu den komplizierteren

Fällen, in denen eine große Anzahl von Elektronen um den Kern herum sich bewegt, ergibt sich nun als eine plausible und durch manche Erfahrungen gestützte Annahme, die, *daß immer eine Anzahl von Elektronen auf einem und demselben Ring* um den Kern herumfliegen, und zwar in gleichen Abständen voneinander. Es kann ein einzelner Ring oder es können viele aufeinanderfolgende Ringe so von Elektronen besetzt sein. Nicht in allen Fällen ist die Stabilität eines solchen Systemes gesichert. Nur diejenigen Anordnungen sind möglich, bei denen das System auch stabil beharren kann.

Die Ausstrahlung kann dabei nun entweder dadurch hervorgerufen werden, daß ein ganzer äußerer Ring sich in einen inneren einschiebt, mit ihm zusammenfließt — was nur dann zu stabilen Anordnungen führt, wenn die beiden Ringe die gleiche Anzahl von Elektronen führen — oder daß ein einzelnes Elektron aus einem äußeren Ring in einen inneren springt.

Die Ermittlung aller möglichen Schwingungen, die ein solches kompliziertes Atom ausführen kann, ist natürlich eine Aufgabe von großer Schwierigkeit und bisher noch in keinem Falle gelöst. Wohl aber läßt sich leicht zeigen, daß die sehr raschen Schwingungen eines solchen Atoms, die *Hochfrequenzschwingungen*, das *Moseley*sche Gesetz (S. 59) befolgen müssen.

Bei der Bestimmung der Schwingungszahlen kommt es ja immer auf die Differenzen der Energie in dem ersten und zweiten Zustand (in dem entfernteren und dem näheren Ring) an. Die Energie eines sich bewegenden Elektrons hängt aber von dem Quadrat seiner Ladung und von dem Quadrat derjenigen Ladung ab, welche auf das sich bewegende Elektron einwirkt. Die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl muß also proportional sein der Ladung des Elektrons (welche konstant ist) und der Ladung des einwirkenden Systems. Wenn nun bei einem komplizierten Atom um den inneren Kern, der eine N-fache Ladung besitzen möge, sich ein Ring von Elektronen befindet, so ist diejenige Ladung, welche auf ein in diesem Ring liegendes Elektron wirkt, nicht mehr die N-fache Elementarladung, sondern kleiner, weil ja eben die anderen Elektronen des Ringes abstoßend, statt anziehend auf dasselbe wirken. Der Ring wirkt also so, als ob statt der N-fachen Ladung des Kernes nur eine verminderte, also (N—a)-fache in dem Kern vorhanden wäre, wobei die Zahl a in einfacher Weise von der Zahl der Elektronen auf dem Ring abhängt. Es ist z. B. bei zwei Elektronen im Ring $a = 0{,}25$, bei drei Elektronen $a = 0{,}57735$, bei vier Elektronen $a = 0{,}9571$ usw. Daraus folgt aber, daß wenn ein Elektron von einem Ring zu einem anderen springt, die *Quadratwurzel aus der Schwingungszahl proportional ist N—a, wobei N die Ordnungszahl des betreffenden Atomes im periodischen System ist*, da ja die Ladung des Kerns dieser Ordnungszahl proportional ist.

In diesem Satz haben wir aber das bei allen Röntgenspektren von *Moseley* gefundene *Gesetz* abgeleitet, *daß die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl eine lineare Funktion der Ordnungszahl des betreffenden Elementes ist.* Dieses merkwürdige Gesetz erklärt sich also ganz aus dem *Bohr*schen Atommodell.

Ja, man kann weiter, wenigstens einigermaßen, durch Vergleich der Beobachtungen über die Schwingungszahlen der K-Linien (zunächst der $K\alpha_1$-Linie) ermitteln, um welchen Ring es sich dabei handelt. *Bohr* hat auf diese Weise gefunden, daß die $K\alpha_1$-Linie dadurch entsteht, daß ein Elektron aus

dem zweiten Ring in den ersten sich bewegt, wobei der erste Ring im stabilen Zustand aus vier Elektronen besteht. Ebenso entsteht die $L\alpha_1$-Linie durch Bewegung eines Elektrons aus dem dritten in den zweiten Ring. Das Auftreten der anderen Linien $K\alpha_2$, $K\beta$ usw. erklärt sich (nach *Sommerfeld*) durch ähnliche Bewegungen.

Diese speziellen Folgerungen sind übrigens durchaus nicht sicher. Man kann nach *Debye* das Auftreten der $K\alpha_1$-Linie auch dadurch erklären, daß im stabilen Zustand der innerste Ring bei *allen* Atomen (vom Natrium aufwärts) ein Ring mit drei Elektronen ist. Wenn durch irgendeine Ursache eines von diesen drei Elektronen auf den zweiquantigen Ring gelangt ist und dann wieder zurückfällt, so daß es die stabile Anordnung wiederherstellt, so entsteht die $K\alpha_1$-Linie und es entsteht entsprechend die $K\beta_1$-Linie, wenn dieses Elektron aus dem dritten Ring in den innersten zurückfällt. Der innerste Ring aller Atome vom Natrium an (weiter hat man die K-Linien nicht beobachtet) wäre danach im stabilen Zustand immer aus drei Elektronen gebildet. In einer Fortsetzung dieser Untersuchung hat *Kroo* wahrscheinlich gemacht, daß der zweiquantige Ring (auch von Natrium an) im stabilen Zustand stets aus 8 Elektronen besteht.

Es ist nach dem Gesagten ganz zweifellos, daß das *Bohr*sche Atommodell eine Anzahl wichtiger und merkwürdiger experimenteller Tatsachen in sehr einfacher Weise umfaßt. Die Erklärung der Serienlinien, speziell die vollständige Erklärung der *Balmer*schen Serie beim Wasserstoff, die Ableitung der *Rydbergschen Konstanten*, die Ableitung des *Moseley*schen Gesetzes für die Röntgenspektren, sind ganz ausgezeichnete Leistungen dieser Atomtheorie. Viele experimentelle Tatsachen erwarten aber erst noch eine eingehendere Erklärung nach dieser Theorie. Speziell sind es eine Reihe von Gesetzmäßigkeiten, die sich bei den Serienspektren der Alkalien und Erden ergeben haben, ferner aber die Gesetzmäßigkeiten, welche bei der Einwirkung eines Magnetfeldes auf die Serienlinien (der sogenannte Zeemaneffekt) gefunden wurden, die noch der genauen Erklärung durch dieses Modell harren. Dagegen hat sich die Einwirkung eines *elektrischen* Feldes auf die Serienlinien (der sogenannte Starkeffekt) recht vollkommen durch das *Bohr*sche Atommodell erklären lassen. Es darf übrigens dabei nicht verschwiegen werden, daß in den *Bohr*schen Annahmen eine ganze Reihe von Willkürlichkeiten enthalten sind, die nur dazu dienten, die *Balmer*sche Serie abzuleiten. Nach unseren bisherigen elektrischen Kenntnissen kann ein Elektron im allgemeinen gar nicht dauernd im Kreise um einen Kern herum rotieren. Es gibt dabei fortwährend Energie an den Äther ab und müßte infolgedessen allmählich in den Kern fallen. Aber die *Bohr*sche Theorie nimmt an, daß gerade in den ausgezeichneten Bahnen keine Ausstrahlung von Energie in den Äther stattfinde. Eine Begründung hat diese Annahme, ebenso wie eine Reihe anderer, an sich nicht, sondern sie ist nur begründet durch den schönen Erfolg, die Erklärung der Serienlinien, und durch die Tatsache, die nicht zu bestreiten ist, daß im Gebiet der Atome, also in den kleinsten Abständen, unsere sonst gefundenen Gesetze der Mechanik und Elektrodynamik nicht allgemeine Gültigkeit besitzen.

SECHSTER VORTRAG

WEITERE UNTERSUCHUNGEN ÜBER DEN BAU DER KERNE, ATOME, IONEN UND MOLEKÜLE. DIE ZERLEGUNG DES STICKSTOFFKERNES

*Atomchemie und Kernphysik * Die Wasserstoffkerne * Die Zerlegung des Stickstoffs * Anhaltspunkte zur Untersuchung des Baues der Atome und Ionen * Die vier ersten Elemente, Wasserstoff, Helium, Lithium, Beryllium * Versuche über die Anordnung der Ringe bei den Elementen höherer Ordnungszahl * Die Bildung der Moleküle durch gemeinsame Ringe * Das Wasserstoffmolekül * Ein Heliummolekül kann sich nicht bilden * Es kann auch keine Verbindung des Wasserstoffs und Heliums unter gewöhnlichen Umständen eintreten * Rückblick und Ausblick*

MAN hat den Chemiker manchmal mit dem Architekten verglichen, da der eine sowohl wie der andere die Gliederung und Zusammensetzung von Bauwerken zum Gegenstand seines Schaffens hat, der eine im großen, der andere im Gebiet der Atome, und da beide außer der wissenschaftlichen Grundlage auch noch die künstlerische Intuition zu ihrer Arbeit notwendig haben, um aus der Fülle von Möglichkeiten das Richtige und Wirkliche zu erkennen. Ebendieselbe künstlerische Intuition wird nötig sein, um die wirkliche Zusammensetzung der Atome aus den Kernen und den Elektronen für alle Fälle zu erforschen. Denn für die Lösung dieser Aufgabe bestehen bisher in allen den Fällen, in denen es sich um eine größere Zahl von Elektronen handelt, nur sehr wenige Anhaltspunkte. Der eine Anhaltspunkt ist der, daß die stabilen Konfigurationen einen größeren Betrag von aufzuwendender Energie brauchen, um zerstört zu werden, als die weniger stabilen Konfigurationen. Wenn man also den Betrag der Energie ausrechnet, der zur Auflösung einer Konfiguration notwendig ist, und diesen Betrag mit dem für eine andere Konfiguration vergleicht, so kann man sofort erkennen, welche Konfiguration wahrscheinlicher ist. Es wird diejenige sein, bei welcher der Energiebetrag größer ist. Aber dieses Kriterium reicht nicht in allen Fällen aus, ja es ist sogar in vielen Fällen irreführend, weil ja auch ein relatives Maximum von Energie stabile Zustände ergeben kann, während größere Werte der aufzuwendenden Energie, wenn sie nicht maximale sind, doch zu labilen Zuständen führen können.

Ein zweiter Anhaltspunkt ist derjenige, den die Chemie an die Hand gibt, indem sie zeigt, daß die *Valenz* der Atome verschieden ist, daß die Atome im allgemeinen 0 oder 1, oder 2, oder 3, oder 4 Valenzen besitzen. Das sagt für unsere Vorstellungen aus, daß in diesen Fällen 0, 1; 2, 3, 4 Elektronen leichter, lockerer an den Kern gebunden sein müssen als die übrigen. Mit diesen locker gebundenen Elektronen kann sich ein Atom an ein anderes anheften. Nun aber lehrt die Chemie weiter, daß die Valenz eines Atoms eine *mehrfache* sein kann, daß unter Umständen die Valenz eines und desselben Atoms eine zweifache, unter anderen Umständen eine dreifache ist, ja daß auch mehr als vierfache Valenzen, fünf-, sechs-, sieben-, achtfache Valenzen vorkommen. Eine vollkommene Theorie des Baus der betreffenden Atome wird die Gründe für diese Mehrwertigkeit aus der Anordnung der Elektronen darzustellen haben.

In dieser Richtung liegen zwar bisher manche, aber doch noch sehr unvollkommene, einander widersprechende Versuche vor. Es ist eine Aufgabe der Zukunft, hier genauere Kenntnisse zu erringen. Die *Chemie der Atomzusammen-*

setzung, die *Überchemie*, hat mit derselben außerordentlich großen Zahl von Möglichkeiten zu rechnen, wie die gewöhnliche Chemie, die Chemie der Molekülzusammensetzungen. So wie es dieser erst allmählich gelang, von einfacheren zu komplizierten Molekülen fortschreitend, selbst bei sehr komplizierten Molekülen die Konstitution klarzulegen, so wird es auch bei der Frage der Konstitution der Atome nur allmählich gelingen, ihre wirkliche Anordnung festzustellen.

Aber noch eine zweite tiefere Aufgabe zeigt sich hier. Bei der Chemie der Atomzusammensetzung handelt es sich darum, bei gegebenem Atomkern die Anordnung der äußeren Elektronen zu finden. Der Kern der meisten Atome ist aber selbst zusammengesetzt. Bei den radioaktiven Substanzen wissen wir, daß er aus Heliumkernen und negativen Elektronen besteht, und wir dürfen für die meisten anderen Atome auch eine solche Zusammensetzung annehmen. Es erwächst also der Wissenschaft die weitere Aufgabe, die *Zusammensetzung der Kerne* zu ermitteln. Da diese Aufgabe, wie bei den radioaktiven Substanzen, zunächst wesentlich durch physikalische Methoden in Angriff genommen werden kann, so können wir von einer *Kernphysik* sprechen. Eine solche Kernphysik, wenn sie überhaupt in Angriff genommen werden kann, würde uns offenbar in die tiefsten Tiefen der materiellen Welt führen, sie würde direkt zu einer Zerlegung und vielleicht auch zu einer Zusammensetzung der Atome führen, also den alten Traum, die alte Hoffnung der Alchemisten, in neuer, aber wissenschaftlich exakter Form realisieren können.

Überraschenderweise ist gerade in der letzten Zeit durch die geniale Forschungsmethode von *Rutherford* diese Kernphysik in der glänzendsten Weise gefördert worden, und sie hat Resultate ergeben, die noch vor kurzer Zeit kein Physiker und kein Chemiker geahnt hätte.

Die Radioaktivität, dieses hauptsächlich von *Rutherford* bearbeitete und ausgebaute Gebiet, ist es, welche direkt mit den Atomkernen und deren Zerfall zu tun hat und durch welche nun auch die neuesten aufsehenerregenden Ergebnisse ans Licht kamen.

Die α-Teilchen, die von den radioaktiven Substanzen ausgeschleudert werden, und welche, wie wir S. 34 besprachen, aus Heliumkernen bestehen, haben eine Reichweite von 3—7 cm, je nach ihrer Geschwindigkeit. Man erkennt die α-Teilchen einfach, indem man einen Schirm aus Zinkblende ihnen aussetzt. Jedes α-Teilchen bringt dann ein momentanes Aufblitzen des Schirmes an der Stelle hervor, an der es ihn trifft. Man sieht daher den Schirm bald da, bald dort aufblitzen, es findet, wie man sagt, ein *Szintillieren* des Schirmes statt, und zwar nur, wenn der Schirm einen Abstand von 3—7 cm von der Quelle der α-Teilchen hatte. Eine genauere Beobachtung, die zuerst von *Marsden* gemacht und dann von *Rutherford* weiter verfolgt wurde, zeigte aber, daß ein schwaches und seltenes Szintillieren des Schirmes noch auf viel weitere Entfernung, bis zu 30 cm stattfindet. Diese szintillierenden Punkte machten aber nicht den Eindruck, als wenn sie von α-Teilchen herrührten, also von doppelt geladenen Heliumkernen, sie machten vielmehr einen anderen Eindruck, und es schien möglich, daß sie von Wasserstoffkernen herrührten.

Diese Vermutung von *Rutherford* zeigte sich durch eine glänzend von ihm durchgeführte Untersuchung bestätigt. Er unterwarf nämlich diese fliegenden Teilchen unbekannter Art sowohl der magnetischen Ablenkung in einem

Magnetfeld, wie der elektrostatischen Ablenkung in einem Kondensatorfelde. Wir besprachen auf S. 25 u. 33, daß man durch Messung der dabei sich ergebenden Ablenkungen einerseits die Geschwindigkeit, anderseits die spezifische Ladung (S. 19) der unbekannten Teilchen bestimmen kann. Und *Rutherford* fand auf diese Weise durch Messung, daß die spezifische Ladung dieser unbekannten Korpuskeln ungefähr 100 000 $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ ist. Wenn wir uns erinnern, daß Wasserstoff bei der Elektrolyse die Ladung 96 494 $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ besitzt (S. 19), so sehen wir, daß wir hier, bis auf die Genauigkeit der sehr schwierigen Beobachtung, dieselbe Zahl finden, woraus mit *Sicherheit zu entnehmen ist, daß die hier in Frage kommenden Teilchen einfach positiv geladene Wasserstoffatome, also Wasserstoffkerne* sind. Die Geschwindigkeit derselben ergab sich durch dieselben Versuche als 1,6mal so groß wie die der Heliumkerne, und die Reichweite, die von der Geschwindigkeit abhängt, wie erwähnt, etwa 4mal so groß, wie die der α-Teilchen.

Die erste Vermutung war natürlich die, daß diese Wasserstoffkerne ebenso Bestandteile des Radiums (Radium C wurde angewendet) wie die Heliumkerne sind und aus diesem frei werden. Aber diese Vermutung konnte nicht bewiesen werden. Es ist auch möglich, daß diese Wasserstoffkerne aus der trotz aller Trocknung noch vorhandenen Feuchtigkeit der Luft oder aus anderen, wasserstoffhaltigen Substanzen freigemacht wurden. Es wurde aber durch Zählung festgestellt, daß auf etwa 100 000 α-Teilchen, von der Reichweite 7 cm, erst *ein* solcher Wasserstoffkern entsteht, und die Rechnung zeigte, daß ein Wasserstoffkern erst frei wird, wenn sich ein α-Teilchen dem Wasserstoffatom auf etwa $3 \cdot 10^{-13}$ cm nähert, also ganz nahe an ihm vorbeifliegt.

Nun untersuchte *Rutherford* weiter, welche Erscheinungen auftreten, wenn α-Teilchen in reinen Sauerstoff oder in reinen Stickstoff eintreten. Es zeigte sich, daß dabei Kerne entstehen, die eine größere Reichweite, 7—9 cm, besitzen, als die erzeugenden α-Teilchen, und es ist wahrscheinlich, daß das Sauerstoff- oder Stickstoffkerne sind, die durch den Stoß aus ihrer Elektronenverbindung freigemacht wurden und weiter fliegen und ebenso Szintillation hervorbringen, wie die α-Teilchen.

Eine ganz unerwartete Erscheinung aber zeigte sich dabei beim *Stickstoff*. Wenn nämlich α-Teilchen in reinen, trockenen Stickstoff eintraten, so ergab sich, daß dabei sehr viel mehr Wasserstoffkerne entstanden, als man erwarten durfte. In reinem Sauerstoff oder in reiner Kohlensäure entstehen — durch die immer vorhandene Feuchtigkeit — zwar auch Wasserstoffkerne, aber in der oben angegebenen beschränkten Zahl. In Stickstoff aber treten unter Umständen nahezu doppelt so viele Wasserstoffkerne auf. An dem Feuchtigkeitsgehalt konnte das nicht liegen, denn es war gleichgültig, ob der Stickstoff möglichst vollkommen getrocknet, oder absichtlich sehr feucht angewendet wurde. Die einzige Erklärung und zugleich eine Erklärung von nicht zu überbietendem Interesse ist die, *daß die Stickstoffkerne auch Wasserstoff enthalten und daß durch den Stoß der α-Teilchen ein solcher Stickstoffkern zerlegt wird und seine Wasserstoffkerne frei auftreten.*

Während in den schweren Atomen der radioaktiven Substanzen Heliumkerne vorhanden sind, zeigt sich hier ein so leichtes Atom, wie das des Stickstoffs, auch als zusammengesetzt und es erweist sich, daß Wasserstoff ein Bestandteil des Stickstoffatoms ist. Bei Sauerstoff ergab sich derartiges nicht. Es ist zu beachten, daß Sauerstoff mit dem Atomgewicht 16 genau 4 Heliumkerne (mit dem Atomgewicht 4) enthalten kann, während Stickstoff mit dem Atomgewicht 14 nicht bloß aus Heliumkernen zusammengesetzt sein kann, sondern noch Kerne anderer Art enthalten muß, von denen so durch die ausgezeichnete Arbeit von *Rutherford* die Wasserstoffkerne nachgewiesen sind. Damit ist ein erstes, höchst überraschendes und für große weitere Erfolge Hoffnung gebendes Resultat der Kernphysik, eine ganz neue Tatsache, gewonnen.

Bei der anderen oben aufgeworfenen Frage, der Frage nach der Struktur der Atome, die aus Kernen und Elektronen bestehen, wird es sich viel weniger darum handeln, ganz neue Tatsachen zu entdecken, als vielmehr, die bekannten Tatsachen systematisch zu benutzen und die Genauigkeit der Beobachtungen zu vergrößern.

Was unzweifelhaft feststeht, ist zunächst, daß die Gesamtzahl der negativen Elektronen bei einem *neutralen Atom* gleich sein muß der gesamten positiven Ladung des Kernes. Aber wir wissen aus den Erfahrungen bei den Kanalstrahlen und bei der Radioaktivität, daß auch *Atomionen* existieren können, d. h. Atome, die positiv oder negativ geladen sind, und zwar einfach oder mehrfach geladen sind. Solche Atomionen müssen nun weniger oder mehr negative Elektronen im Bereich des Kernes besitzen, als die entsprechenden neutralen Atome. Sind ein, zwei, drei usw. Elektronen weniger vorhanden als im neutralen Atom, so haben wir es mit einem Atom mit einfacher, oder doppelter, oder dreifacher ... *positiver* Ladung zu tun. Sind umgekehrt 1, 2, 3 ... Elektronen mehr an den Kern gebunden, als dem neutralen Atom entspricht, so ist ein Atom mit ein-, zwei-, drei- ... facher *negativer* Ladung gebildet. Es wird dabei zu berücksichtigen sein, daß bei der Elektrolyse die Metalle und der Wasserstoff mit positiven Ladungen auftreten, daß sie *elektropositiv* sind, daß ihnen also leicht ein oder mehrere Elektronen *fehlen* können, während die elektronegativen Ionen, wie Chlor, Sauerstoff usw., *mehr* Elektronen besitzen, als der Ladung ihres positiven Kerns entspricht. Eine genaue Durchführung der Atomzusammensetzung muß auch dieses verschiedene Verhalten der verschiedenen Atome berücksichtigen.

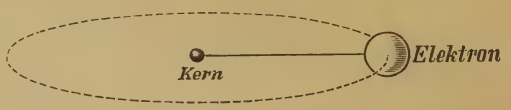
Sehr viel einfacher als bei den Atomen höherer Ordnungszahl liegen die Verhältnisse bei den vier ersten Atomen des periodischen Systems, beim Wasserstoff, Helium, Lithium und Beryllium. Bei diesen reicht man mit den angegebenen Gesichtspunkten im allgemeinen aus, um sowohl die Konstitution des neutralen Atoms wie auch die Möglichkeit der Atomionen festzulegen.

1. Wasserstoff.

Der positive Kern ist bei dem *neutralen Atom* begleitet von einem Elektron. In der stabilsten, permanenten Lage (wenn das Elektron sich auf dem innersten, einquantigen Kreis befindet) hat es einen Abstand von $0{,}55 \cdot 10^{-8}$ cm von dem Kern und durchläuft diesen Kreis $6{,}2 \cdot 10^{15}$mal pro Sekunde. Diese Zahlen lassen sich berechnen, wie wir oben gefunden haben (S. 73), da zwei Gleichungen zwischen dem Radius des stabilsten Kreises und der Geschwindigkeit

bestehen, Gleichungen, aus denen man diese beiden Größen berechnen kann, wenn die Ladung des Kerns, die Ladung und Masse eines Elektrons und die *Planck*sche Konstante bekannt sind. Das neutrale Wasserstoffatom hat also eine Form wie in Fig. 28[1]).

Fig. 28.



Neutrales Wasserstoffatom.

Ist das Elektron von seinem Kern aus irgendeinem Grund losgerissen, so haben wir es bloß mit dem Kern zu tun, der dann ein *positives Wasserstoffion* ist. Dieser Kern tritt bei der Elektrolyse des Wassers (verdünnter Säuren) auf und, wie gerade erwähnt, bei einer Reihe von radioaktiven Erscheinungen.

Es können aber auch um den Kern in etwas größerem Abstand zwei negative Elektronen rotieren. Die zur Zerstörung dieses Systemes aufzuwendende Energie ist noch etwas größer als bei dem Atom im neutralen Zustand. Man erhält so ein negativ geladenes Wasserstoffatom, wie es bei den Kanalstrahlen gefunden wurde. Der Abstand der beiden Elektronen vom Kern ist 1,33mal so groß wie beim neutralen Atom, die Zahl der Umläufe pro Sekunde aber nur 0,563 der früheren. Fig. 29 stellt dieses negative Wasserstoffion dar. Mehr

Fig. 29.

Negatives Wasserstoffion.

als eine negative Ladung kann das Wasserstoffatom nicht annehmen, es ist auch nichts Derartiges beobachtet worden.

2. Helium.

Der Kern mit der doppelten Elementarladung bildet das *zweifach positiv geladene Heliumion*, also das α-Teilchen der Radioaktivität. Um diesen Kern kann sich *ein* Elektron bewegen, dann haben wir es mit einem *einfach* positiv geladenen Heliumion zu tun. Der Abstand des Elektrons ist dabei bloß die Hälfte von dem beim Wasserstoffatom, wie Fig. 30 zeigt. Dagegen rotiert das Elektron viermal so rasch um den Kern, wie dasjenige des Wasserstoffatoms.

Das *neutrale* Heliumatom besitzt nach *Bohr* zwei Elektronen, die um den Kern kreisen, und zwar in einem etwas größeren Abstand (1,15 von dem des

1) In dieser und den folgenden Figuren sind die Radien der Kreise im richtigen Verhältnis gezeichnet. Die Elektronen sind als große Kugeln, die Kerne als Punkte angegeben, was wenigstens beim Wasserstoff deren gegenseitiges Größenverhältnis veranschaulicht. Dagegen sind die Dimensionen der Elektronenkugeln weit übertrieben gezeichnet gegenüber den Radien der Kreise.

positiven Heliumions) und mit etwas kleinerer Geschwindigkeit ($^3/_4$ von der beim positiven Heliumion) (Fig. 31). Indes ist es fraglich, ob dies die richtige Anordnung der beiden Elektronen für das neutrale Heliumatom ist. Es könnte auch jedes von den beiden Elektronen auf einer besonderen Bahn um den Kern

Fig. 30.

Einfach positiv geladenes Heliumatom.

kreisen und es scheint sogar, daß eine solche Konfiguration stabiler sein kann als die von *Bohr* angenommene.

Ein Heliumkern mit drei Elektronen würde zu seinem Zerfall geringere aufzuwendende Energie erfordern als ein solcher mit zwei Elektronen, kann also nicht bestehen. *Ein negativ geladenes Heliumion gibt es nicht.* Auch folgt daraus, daß ein Heliumatom keine Affinität für andere Elemente hat, daß

Fig. 31.

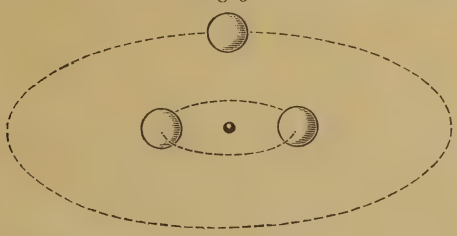
Neutrales Heliumatom.

Helium ein träges Gas ist. Bei der Untersuchung der Molekülbildung kommen wir darauf zurück.

3. Lithium.

Nach der Theorie kann außer dem dreifach positiv geladenen Kern noch ein Ion mit zwei oder einer positiven Ladung bestehen. Das erste enthält ein Elektron im Abstand eines Drittels von dem des Wasserstoffatoms und mit neunmal so großer Umlaufgeschwindigkeit, das zweite enthält zwei Elek-

Fig. 32.



Lithiumatom.

tronen in einem etwas größeren Abstand und mit etwas kleinerer Umdrehungsgeschwindigkeit.

Das *neutrale* Lithiumatom ist vermutlich so gebildet, wie es Fig. 32 zeigt. Zwei Elektronen kreisen in einem inneren Kreis, ein drittes Elektron, schwächer gebunden, in einem äußeren Kreis. Dieses eine Elektron bedingt die Einwertigkeit des Lithiums. Die Radien des inneren und äußeren Kreises sind 0,362-

und 1,182mal so groß wie beim Wasserstoff. Die Umlaufzahlen pro Sekunde sind bei den beiden inneren Elektronen 7,65mal so groß wie beim Wasserstoff, bei dem äußeren aber nur 0,71 von der des Wasserstoffelektrons.

Unter Umständen kann auch noch ein zweites Elektron in den äußeren Kreis (der dann etwas kleiner wird) treten, dann erhalten wir ein negativ geladenes Lithiumion.

4. Beryllium.

Beim Beryllium mit vier Elektronen kann ein *neutrales* Atom so gebildet sein, daß alle vier Elektronen sich auf einem Kreise vom Radius 0,329 (der des Wasserstoffs als Einheit genommen) in gleichem Abstand bewegen, oder daß zwei Elektronen auf einem inneren Kreis vom Radius 0,262 und die beiden anderen auf einem äußeren Kreis vom Radius 0,673 sich bewegen, die ersteren mit einer 14,6mal, die letzteren mit einer 2,2mal so großen Winkelgeschwindigkeit wie das Elektron des Wasserstoffs. Die zweite dieser Möglichkeiten ist die wahrscheinlichste, weil Beryllium chemisch zweiwertig ist und die beiden äußeren, schwach gebundenen Elektronen diese Zweiwertigkeit hervorbringen können.

Atome mit einer größeren Zahl von Elektronen.

Der Möglichkeiten, wie die Elektronen um einen Kern von einer großen Zahl von positiven Ladungen angeordnet sind, sind so viele, daß eine Sicherheit oder selbst ein genaues Kriterium für die eine oder andere Annahme bisher nicht vorliegt. Es ist zu vermuten, daß die Elektronen in *Ringen* um den Kern angeordnet sind, aber über die Zahl und Besetzung der Ringe hat man keine Sicherheit. Man ist hierbei meistens auf plausible Annahmen beschränkt, die aber ebensogut Falsches wie Richtiges geben können. *Einen* Anhaltspunkt gibt erstens das periodische System der Elemente, welches zeigt, daß die Atome der neunten Stelle wieder Ähnlichkeit mit denen der ersten Stelle haben, daß also eine Periodizität mit der Stellenziffer 8 vorliegt. Genauer zeigt unsere Tabelle auf S. 61, daß bei den einzelnen untereinanderstehenden also gleichartigen Elementen jeder Kolumne die Differenzen der Ordnungszahlen folgende sind:

8, 8, 8, 18, 18, 32,

daß dagegen die Differenz der unter a und b aufeinanderfolgenden Elemente

10

beträgt. Einen *zweiten* Anhaltspunkt gibt die Wertigkeit der Elemente, welche in einer solchen Reihe von acht Elementen von 0 bis 4 steigt und dann wieder bis 0 fällt, wenn man in der Reihe der Atomgewichte weiter geht. Man ist wohl sehr berechtigt, die Wertigkeit der Elemente darauf zu schieben, daß 1, 2, 3 oder mehr Elektronen auf dem äußersten Ring des Atoms liegen, und daß durch diese Elektronen sich das Atom mit einem anderen verknüpft. Danach würden die Edelgase, weil sie die Wertigkeit 0 haben, kein solches freies Elektron außen besetzen, sondern mit einem vollbesetzten Ring abschließen. Es ist auch weiter eine plausible Annahme, daß wenn ein solcher voller Ring sich bei einem Atom einmal gebildet hat, er bei den folgenden Atomen bestehen bleibt, so daß die weiteren hinzukommenden Elektronen einen neuen Ring

bilden. Indes ist immerhin auch möglich, daß die Stabilität eines inneren Ringes durch außen neu hinzutretende Ionen geändert werden kann.

Danach gab *Bohr* für die ersten 24 Elemente (vom Wasserstoff bis zum Chrom) eine Anordnung, die durch die folgende Tabelle angegeben ist. Die vertikalen Kolonnen zeigen die aufeinanderfolgenden Ringe um den Kern an, vom innersten angefangen. Die Zahlen in diesen Kolonnen bedeuten die Zahl der Elektronen, welche auf jedem Ring vorhanden sind. Die Gesamtzahl der Elektronen ist natürlich immer gleich der Ordnungszahl des Atoms.

Ordnungszahl	Name des Elements	1. Ring (innerster)	2. Ring	3. Ring	4. Ring	5. Ring
1	Wasserstoff H	1	—	—	—	—
2	Helium He	2	—	—	—	—
3	Lithium Li	2	1	—	—	—
4	Beryllium Be	2	2	—	—	—
5	Bor B	2	3	—	—	—
6	Kohlenstoff C	2	4	—	—	—
7	Stickstoff N	4	3	—	—	—
8	Sauerstoff O	4	2	2	—	—
9	Fluor F	4	4	1	—	—
10	Neon Ne	8	2	—	—	—
11	Natrium Na	8	2	1	—	—
12	Magnesium Mg	8	2	2	—	—
13	Aluminium Al	8	2	3	—	—
14	Silicium Si	8	2	4	—	—
15	Phosphor P	8	4	3	—	—
16	Schwefel S	8	4	2	2	—
17	Chlor Cl	8	4	4	1	—
18	Argon Ar	8	8	2	—	—
19	Kalium K	8	8	2	1	—
20	Calcium Ca	8	8	2	2	—
21	Scandium Sc	8	8	2	3	—
22	Titan Ti	8	8	2	4	—
23	Vanadin V	8	8	4	3	—
24	Chrom Cr	8	8	4	2	2

Wenn auch in dieser Anordnung die gewöhnliche Wertigkeit der Elemente berücksichtigt ist, so gibt sie doch keinen Anhaltspunkt für die verschiedene Wertigkeit, die viele Elemente unter Umständen zeigen. In der Reihe 10 bis 18 steigt wegen der lose gebundenen Elektronen im äußersten Ring die Wertigkeit von 0 (Neon) bis 4 (Silicium), um dann wieder bis 0 beim Argon abzunehmen. Daß aber das Chlor auch unter Umständen fünfwertig sein kann, erscheint zwar noch möglich, wenn der vorletzte Ring eben auch nur schwach gebundene Elektronen besitzt. Daß es aber auch drei- und siebenwertig sein kann, ist aus dieser Anordnung nicht zu erkennen. Ebensowenig ergibt sich aus dem Schema die Möglichkeit der Fünfwertigkeit des Phosphors und Stickstoffs, die doch eine Tatsache ist. Allerdings kann die Mehrwertigkeit auch davon

abhängen, daß durch Annäherung eines anderen Atoms die Konfiguration geändert wird.

Wenn das oben (S. 81) angeführte Resultat von *Debye* und seine Erweiterung durch *Kroo* zuverlässig ist, daß der innerste Ring bei allen Atomen vom Natrium an aus drei Elektronen und der zweite bei allen aus acht Elektronen besteht, so ist die obige Anordnung damit von vornherein und im ganzen verfehlt.

Eine ganz andere Anordnung, die gerade auf dem Resultat von *Debye* aufgebaut ist, gibt ebenfalls zu vielen Zweifeln Veranlassung. Sie gibt dem innersten Ring immer drei Elektronen, dem nächsten, sobald er sich einmal vollständig gebildet hat, immer sieben, dem dritten acht Elektronen usw., und nimmt an, daß jeder so einmal voll ausgebildete Ring bei den folgenden Elementen immer wiederkehrt, daß bei diesen bloß eine weitere Anlagerung von Elektronen in einem folgenden Ring bis zu einer Höchstzahl auftritt.

In dieser Anordnung werden z. B. dem Chlor drei Ringe mit der Elektronenzahl (von innen nach außen) 3, 7, 7 zugeschrieben, wodurch sich zwar die Siebenwertigkeit des Chlors, nicht aber ohne weiteres seine Ein-, Drei-, Fünfwertigkeit erklärt. Der Phosphor hat drei Ringe mit den Elektronenzahlen 3, 7, 5, wodurch seine Fünfwertigkeit, aber nicht ohne weiteres seine Dreiwertigkeit erklärt wird. Denn man muß annehmen, daß alle Elektronen auf dem äußersten Ring gleich stark bzw. gleich schwach gebunden sind, so daß der Phosphor entweder nur fünfwertig oder ebensogut vierwertig wie dreiwertig, zweiwertig und einwertig werden könnte.

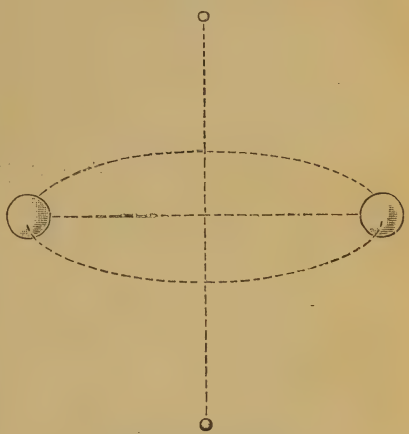
Diese Betrachtungen also für die Atome hoher Ordnungszahl sind noch vollständig illusorisch. Genauere Untersuchungen über die Linienspektren und Röntgenspektren werden vielleicht allmählich hier die Mittel zu größerer Sicherheit gewähren.

Insbesondere wird aber eine Untersuchung der *Molekülbildung* aus diesem Atommodell noch weitere Aufklärung bieten, eine Untersuchung, die allerdings sehr schwierig zu sein scheint und von der bisher nur die ersten Anfänge ausgearbeitet sind.

Bei *Molekülen* haben wir es nicht mehr mit *einem* zentralen Kern zu tun, sondern mit mehreren, mindestens zweien, um die die Elektronen sich bewegen. Ein neutrales *Wasserstoffmolekül* wird aus zwei Kernen in einem gewissen Abstand bestehen und aus zwei Elektronen. Denken wir uns zwei Atome wie Fig. 28 zunächst in großer Entfernung und nähern wir durch eine äußere Kraft den einen Kern dem anderen, so wird das Elektron, das um den einen Kern kreist, von dem anderen Kern angezogen und ebenso das Elektron des zweiten Kerns von dem ersten, und diese Anziehung wird mit wachsender Annäherung der Kerne wachsen. Es werden sich also die Bahnen der Elektronen wegen dieser Anziehung rascher nähern, als wir die Kerne durch die äußere Kraft einander nähern. In einem gewissen Abstand der beiden Kerne werden also die Bahnen der beiden Elektronen zusammenfallen und eine einzige Bahn bilden, auf der die beiden Elektronen um die Achse, die die beiden Kerne verbindet, herumrotieren. *In diesem Moment hat sich das Wasserstoffmolekül gebildet.* Die Abstoßungskraft zwischen den beiden Kernen wird dann gerade aufgehoben durch die Anziehungskraft, welche die beiden Elektronen auf jeden der beiden Kerne ausüben.

Die *Bindung der beiden Atome zu einem Molekül* geschieht also dadurch, daß die beiden Elektronen in einem gemeinsamen Kreis um die Verbindungslinien der Kerne kreisen. Die genauere Berechnung zeigt, daß der Radius dieses Kreises etwas kleiner (0,95) als der des ersten Kreises eines Wasserstoffatoms ist, und daß der Abstand der beiden Kerne 1,16mal so groß ist wie der Durchmesser dieses Kreises. Fig. 33 zeigt eine Darstellung des Wasserstoffmoleküls. In absoluten Zahlen ist der Radius des Kreises $0{,}52 \cdot 10^{-8}$ cm, der Abstand der beiden Kerne $1{,}22 \cdot 10^{-8}$ cm. Zugleich zeigt eine genaue numerische Berechnung, daß die zur Auflösung der beiden getrennten Atome zusammen aufzuwendende Energie kleiner ist als die zur Auflösung des so gebildeten Moleküls aufzuwendende Energie, so daß also das Molekül sich *von selbst* aus den Atomen bildet unter Ausgabe von Energie, die als die Bildungswärme des Wasserstoffmoleküls erscheint.

Fig. 33.



Wasserstoffmolekül.

Die für die Atomtheorie immer rätselhaft gewesene Tatsache, woher es kommt, daß zwei Atome Wasserstoff immer in einen engeren Verband zu einem Molekül zusammentreten und auf welcher Eigenschaft der Atome diese Bindung beruht, erfährt hier eine einfache und plausible Erklärung. *Der gemeinsame Elektronenkreis bringt die Bindung der beiden Kerne hervor*, die ohne diese Bindung sich gegenseitig abstoßen würden.

Es soll aber nicht unerwähnt bleiben, daß gegen diese Darstellung des Wasserstoffmoleküls sich Einwände in bezug auf seine Stabilität erheben lassen, die vielleicht zu einer Änderung derselben Anlaß geben werden. Die Bindung aber der beiden Kerne derart, daß die Elektronen um ihre Verbindungslinie umlaufen, wird wohl bestehen bleiben. Sie gewährt die eigentliche Erklärung der Molekülbildung.

Danach sollte man zunächst erwarten, daß bei dem nächst einfachen Element, dem *Helium*, auch ein solches Zusammentreten zweier Atome zu einem Molekül stattfinden könnte, was ja bekanntlich, da Helium einatomig ist, nicht der Fall ist. Wenn wir hier ebenso verfahren, wie vorhin beim Wasserstoff, daß wir zwei Heliumatome, deren jedes um den Kern zwei Elektronen in einem Kreis besitzt (wir wissen aber aus S. 87, daß das nicht die einzige Möglichkeit für das He-Atom ist), einander in der Richtung der Verbindungslinie der Kerne einander nähern, so wird folgendes eintreten.

Wegen der Anziehung der Kerne je auf die Elektronen des anderen Atoms werden die Ebenen der beiden Elektronenkreise sich rascher nähern, als die Kerne aneinandergebracht werden, und es wird in einem bestimmten Moment der Fall eintreten, daß die beiden Elektronenebenen zusammenfallen, während die Kerne noch einen bestimmten endlichen Abstand besitzen. Die vier Elektronen in demselben Kreis werden sich dann wegen ihrer gegenseitigen

Abstoßung von selbst so einstellen, daß sie um je einen Viertelkreis voneinander abstehen. Das Heliummolekül scheint damit gebildet zu sein. Aber wenn man die aufzuwendende Energie zur Auflösung der beiden getrennten Heliumatome numerisch ausrechnet und ebenso die Energie zur Auflösung des so entstandenen Heliummoleküls, so findet man, daß die letztere kleiner ist als die ersteren zusammengenommen. *Daher kann sich das Heliummolekül von selbst nicht bilden.* Es müßte eine Zufuhr von Energie von außen dazukommen, um die Heliumatome in ein Molekül zusammentreten zu lassen. Wir können diesen Unterschied zwischen den Wasserstoffatomen und den Heliumatomen auch so ausdrücken, daß wir sagen, die beiden Wasserstoffatome ziehen einander an, während die Heliumatome einander abstoßen. *Daher entsteht die Einatomigkeit des Heliumatomes.* Es ist eine Aufgabe der Zukunft, für höhere Atome die Molekülbildung ebenso zu erforschen, und es wird dabei notwendig sein, nachzuweisen, daß beim Neon, Argon, Xenon, Krypton im Gegensatz zu den je benachbarten Elementen auch eine solche Einatomigkeit sich ergibt.

Auch eine Annäherung eines Wasserstoffatoms und eines Heliumatoms kann kein Heliumwasserstoffmolekül geben. Denn erstens haben die beiden Elektronen des Heliumatoms einen viel kleineren Abstand von dem Kern, als das Elektron des Wasserstoffs von seinem Kern, es würden also die beiden Kreise nicht zusammenfließen, sondern getrennt bleiben, und außerdem wäre auch hier die zur Zerstörung des Moleküls aufzuwendende Energie kleiner als die entsprechende Energie für die Summe der beiden Atome, so daß die Bildung des Moleküls nicht von selbst, unter Abgabe von Energie stattfinden könnte.

Wenn auch für die höheren Atome die Aufstellung ihrer Konstitution noch nicht im einzelnen durchgeführt werden kann, so kann man doch es als wahrscheinlich hinstellen, daß allgemein die Bildung eines Moleküls aus zwei gleichartigen oder zwei ungleichartigen Atomen dadurch zustande kommt, daß wie beim Wasserstoff ein gemeinsamer Ring sich um die beiden getrennten Atome legt, *ein Ring, der die Bindung der Atome zum Molekül bewirkt.* Und zwar ist anzunehmen, daß es bei allen Molekülen die äußersten Elektronen, die Elektronen des äußersten Ringes sind, welche so zusammenfließen, daß sich das Molekül bildet.

Wenn wir nun nach diesen Vorstellungen uns die verschiedenen Einwirkungen physikalischer und chemischer Kräfte auf die Atome überlegen und untersuchen, wie sich diese Einwirkungen äußern, so haben wir folgende Reihenfolge.

1) Die chemischen Erscheinungen vollziehen sich im wesentlichen an den *äußersten* Ringen der Atome. Diese äußersten Ringe verschmelzen ineinander und bringen die Bildung des chemischen Moleküls hervor.

2) Die Einwirkung sehr hoher *Temperaturen* einerseits und der *elektrischen Erregung* (in den Geißlerröhren) anderseits wirkt auch auf die *äußeren* aber auch vielfach auf die *mehr nach innen gelegenen Ringe* ein, indem sie diese zerstört, so daß bei ihrer Rückbildung die gewöhnlichen Spektra entstehen.

3) Das Bombardement der Elektronen, welches die Röntgenstrahlen hervorbringt, beeinflußt im wesentlichen die *innersten* Ringe der Atome, indem es sie zerstört. Durch ihre Rückbildung entstehen die K-, L- und M-Strahlen der Röntgenspektra.

4) Die *Atomkerne* selbst endlich kommen bei der Radioaktivität in Betracht. Spontan zersetzen sich bei den schwersten Atomen die Kerne selbst und senden die α- und β-Strahlen aus. Die zugehörigen γ-Strahlen kann man nach *Rutherford* als die charakteristischen Röntgenstrahlen der betreffenden radioaktiven Stoffe auffassen. Die α-Teilchen zersetzen auch andere Kerne, wie das beim Stickstoff nachgewiesen ist.

So *greift die Radioaktivität* in das Allerinnerste des Atoms, *in seinen Kern ein* und bewirkt dadurch eine wirkliche Umwandlung der Atome. Denn ein bestimmtes Atom ist nach der *Rutherford-Bohr*schen Theorie nur gekennzeichnet durch die Ladung seines Kernes. Wieviel Elektronen um den Kern kreisen, das hängt von den Umständen ab und bringt bloß die Unterscheidung zwischen dem neutralen Atom und den positiven oder negativen Atomionen hervor. *Eine Veränderung des Kernes aber bildet ein neues Atom.* Diese Veränderung des Atoms konnten wir bisher noch durch kein uns zur Verfügung stehendes Mittel beeinflussen. Sie geschah von selbst spontan, wie bei den radioaktiven Substanzen, oder sie geschah nicht. Durch die angeführten neuen Forschungen von *Rutherford* aber ist der erste Schritt geschehen, wie wir hier selbsttätig eingreifen können. Und wenn dieser Anfang weitere Fortsetzung finden wird, wenn wir hier die Mittel zum Eingreifen, zum Beeinflussen anwenden können, wenn wir diese Kernzersetzung rascher oder langsamer machen können, und wenn wir sie weiter auf andere Atome als die bisherigen werden ausdehnen können, dann wird diese *Überchemie*, die Chemie und Kernphysik der Atome, deren wissenschaftliche Vielseitigkeit wir hier besprochen haben, auch die ungeahntesten praktischen Erfolge zeitigen.

WEITERE WERKE DESSELBEN VERFASSERS

Ende 1920 erscheint

DIE ELEKTRIZITÄT UND IHRE ANWENDUNGEN

von Dr. L. Graetz

20. Auflage / 107.–116. Tausend

Mit etwa 700 Abbildungen

Preis etwa 50 Mark

Der Umstand, daß nun 19 starke Auflagen, davon die letzte von 10 000 Exemplaren innerhalb $^3/_4$ Jahren, verkauft wurden, spricht am deutlichsten für die Unentbehrlichkeit dieses berühmten Buches. Die neue Auflage ist vom Verfasser auf den allerletzten Stand gebracht worden, sodaß das Buch allen Anforderungen entspricht. Die Presse sagt über dieses Werk, das zum eisernen Bestand jeder Hausbibliothek gehört:

Aus „*Die Zeit*“, Wien 1911: „Seine ganz ungewöhnliche Popularität verdankt das Buch der durchsichtigen, klaren und einfachen Art, mit der es Graetz versteht, das schwerste Kapitel der Naturwissenschaft, die Elektrizität, diese für viele noch immer unfaßbare und rätselhafte Naturkraft, dem Leser verständlich zu machen. ... Ein Buch, wie es der ‚Graetz‘ ist, gehört in die Bibliothek jedes Gebildeten, mag er nun Techniker, Kaufmann oder Arbeiter sein.“

VERLAG VON J. ENGELHORNS NACHF. STUTTGART

WEITERE WERKE DESSELBEN VERFASSERS

Ende November 1920 erscheint

KURZER ABRISS DER ELEKTRIZITÄT

von Dr. L. Graetz

12. und 13. Auflage / 56.–65. Tausend

Mit 177 Abbildungen

Preis 18 Mark

Auch dieses Buch hat einen von Jahr zu Jahr wachsenden Abnehmerkreis gefunden und ist von dem Verfasser für diese neue Auflage vollständig durchgearbeitet worden. Es gibt die beste kurzgefaßte Orientierung über das Wesen und die Anwendungsarten der Elektrizität. Die Presse schrieb über die früheren Auflagen:

Zeitschrift für Elektrochemie: Graetz ist einer der erfolgreichsten Schriftsteller auf dem Gebiete der elementaren Darstellung über Elektrizität. Ref. kennt kein besseres Buch für den ersten Anfang elektrischer Studien. Der Anfänger, der begonnen hat, es zu lesen, wird es auch durchlesen. H. D.

Dinglers polytechnisches Journal: Unterstützt von zahlreichen guten Abbildungen und einer allen Anforderungen Rechnung tragenden Ausstattung, ist dieses Werk als einer der besten Beiträge auf dem Gebiete der populären elektrotechnischen Literatur zu bezeichnen. A. P.

VERLAG VON J. ENGELHORNS NACHF. STUTTGART

BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY
3 1197 20985 6035